

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství



**Struktura a korozní vlastnosti pozinkovaného plechu  
v oblasti řezu laserem**

**Structure and corrosion properties of galvanized sheet  
in the area of laser cutting**

Bc. Jiří Cieslar

*Diplomová práce*

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Stanislav Lasek, Ph.D.

Ostrava 2018

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jiří Cieslar**

Studijní program:

N3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor:

3911T036 Progresivní technické materiály

Téma:

**Struktura a korozní vlastnosti pozinkovaného plechu v oblasti řezu laserem**  
**Structure and corrosion properties of galvanized sheet in the area of laser cutting**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika zinkování
2. Základní charakteristiky procesu řezání laserem
3. Mechanismy koroze a faktory ovlivňující korozní odolnost pozinkovaných plechů
4. Experimentální část – provedení korozních zkoušek, metalografický rozbor
5. Zpracování, vyhodnocení a diskuze výsledků, závěry

Seznam doporučené odborné literatury:

1. KREIBICH, Viktor a HOCH, Karel. Koroze a technologie povrchových úprav. Praha: České vysoké učení technické, 1984.
2. STANSBURY, Ele Eugene and BUCHANAN, Robert Angus. Fundamentals of electrochemical corrosion. Materials Park: ASM International, 2000. ISBN 0-87170-676-8.
3. SCHWEITZER, Philip A. Encyclopedia of corrosion technology. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, c2004. ISBN 0-8247-4878-6.
4. ION, John C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application [online]. Amsterdam: Elsevier, 2007 [cit. 2017-11-23]. ISBN 978-0-7506-6079-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Stanislav Lasek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 09.05.2018

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování diplomové práce

## I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).



Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslované (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

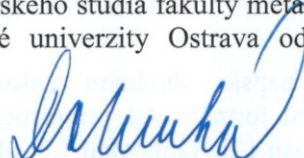
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 7.5.2018 .....

.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou korozních vlastností pozinkovaného plechu v oblasti řezu laserem. Teoretická část popisuje různé typy zinkových povlaků s ohledem na jejich aplikaci, strukturu, vlastnosti atd. Jsou zde zmíněny také základní informace o procesu řezání laserem. Hlavní část rešerše je zaměřena na korozní vlastnosti a korozní odolnost zinkových povlaků speciálně v oblasti laserového řezu. Experimentální část obsahuje výsledky korozních zkoušek, které byly provedeny za účelem zjištění korozní odolnosti v oblasti tavného laserového řezu pozinkovaného plechu a také výsledky metalografického šetření oblastí blízkých řezu laserem. Korozní testy zahrnují elektrochemické korozní měření, expoziční zkoušky v solné mlze a v klimatické korozní komoře. Cílem experimentu bylo porovnat korozní odolnost na plochách řezů, které byly vytvořeny v atmosféře s kyslíkem nebo dusíkem a zhodnotit ochranný galvanický účinek zinkového povlaku na oblast laserového řezu.

## **Klíčová slova**

Zinkové povlaky, korozní odolnost, laserové řezání, korozní zkoušky

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the issue of corrosion properties of galvanized sheet in the area of laser cutting. The theoretical part describes different types of zinc coatings with the regard on their application, structure, properties etc. The basic facts about process of laser cutting are mentioned here too. Finally, the major part is focused on the corrosion properties and corrosion resistance of zinc coatings especially in the area of laser cutting. The experimental part contains results of the corrosion tests, that were carried out in order to find out the corrosion resistance in the laser cutting area of galvanized sheet, and the result from the metalography of laser cutting area too. Corrosion tests comprise electrochemical corrosion measurements, salt spray test and climate chamber test. The aim of the experiment was to compare corrosion resistance and corrosion properties in the laser cutting area, that were performed in the atmosphere of oxygen and nitrogen and evaluation of galvanic protection of zinc coating to the laser cutting area.

## **Key words**

Zinc coatings, corrosion resistance, laser cutting, corrosion testing

Chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu docentu Ing. Stanislavu Laskovi, Ph.D. za odborné rady, cenné připomínky a vstřícný přístup během všech konzultací. Mé poděkování patří také paní Naděždě Brychtové za spolupráci při přípravě metalografických výbrusů.

Tato diplomová práce vznikla za přispění projektů Studentské grantové soutěže „SP2018/70 Studium souvislostí mezi technologií výroby a zpracováním pokročilých materiálů, jejich strukturními parametry a užitnými vlastnostmi“ a „SP2018/60 Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství“.

## Obsah

1. ÚVOD .....	2
2. POZINKOVANÉ OCELOVÉ PLECHY .....	3
2.1 Metody nanášení zinkových povlaků .....	3
3. LASEROVÉ ŘEZÁNÍ .....	11
3.1 Charakteristika procesu řezání laserem .....	12
3.2 Metody řezání laserem .....	13
3.3 Konstrukce laseru .....	14
3.4 Základní parametry zpracování .....	16
3.5 Vyhodnocení kvality řezání laserem .....	18
3.6 Materiály pro laserové řezání .....	20
4. KOROZE .....	21
4.1 Korozní vlastnosti zinku .....	22
4.2 Korozní vlastnosti zinkových povlaků .....	24
4.2.1 Koroze v oblasti hrany řezu (galvanická koroze) .....	25
4.2.2 Fretting .....	27
4.3 Korozní vlastnosti zinkových povlaků v různých prostředích .....	29
4.3.1 Atmosférická koroze .....	29
4.3.2 Koroze ve vodách .....	33
4.3.3 Koroze v půdě .....	35
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	36
5.1 Vzorky pro experimentální měření .....	36
5.2 Hodnocení a měření nanesených zinkových povlaků na vzorcích .....	37
5.3 Elektrochemické zkoušky ve vybraných roztocích .....	43
5.4 Expozice vzorků v komoře solné (KS) a komoře klimatické (KK) .....	46
5.5 Metalografie pozinkovaných plechů .....	53
6. ZÁVĚR .....	58
Seznam použitých zkratk .....	60
LITERÁRNÍ ZDROJE .....	61



# 1. ÚVOD

Studium protikoroziční ochrany zinkových povlaků patří mezi základní pilíře zájmu koroziního inženýrství. A poznatky získané z prací o vlastnostech těchto typů protektivních vrstev přináší možnosti reálného uplatnění v technické praxi. Ať už jde o možnosti ekonomických úspor, vyplývajících ze snížení úbytku materiálu vlivem korozičního napadení (např. potřeba tenčích ochranných vrstev), nebo zvýšení bezpečnosti zařízení, u kterých by mohlo vlivem koroze dojít k náhlému porušení apod.

Podstatou ochranného působení zinkových povlaků na ocelových předmětech před korozičním napadením je jednak bariérový účinek povlaků, které brání přístupu kyslíku a vlhkosti k povrchu oceli, jednak katodická ochrana v místech porušení (např. rýhy, střížné hrany apod.). Tento děj, tj. katodická ochrana naneseného zinkového povlaku, je možný díky faktu, že zinek je elektronegativnější než ocel a přítomností elektrolytu.

Ačkoli je problematika protektivního účinku zinkových povlaků v odborné literatuře bohatě popsána a zdokumentována, jen málo prací se zabývalo vlivem jejich účinku na oblast řezu laserem. Následující stránky proto budou zaměřeny nejen na obecné rysy spojené se zinkovými povlaky, ale i na koroziční odolnost v oblasti laserového řezu, a to pak zejména v praktické části této práce.

Cílem experimentální části mé diplomové práce je popis a charakteristika struktury a korozičních vlastností pozinkovaného plechu v oblasti laserového řezu, přičemž zkoumány jsou plochy řezů vytvořené jak v atmosféře s dusíkem, tak s kyslíkem. Pro zhodnocení koroziční odolnosti byly provedeny zkoušky elektrochemické, expoziční zkoušky v korozičních komorách a rovněž bylo provedeno pozorování mikrostruktury na metalografických výbrusech.

## 2. POZINKOVANÉ OCELOVÉ PLECHY

Ačkoliv se na poli inženýrských aplikací vyvinulo mnoho nových a progresivních materiálů, jsou oceli stále považovány za hlavní konstrukční materiál pro automobilový průmysl, pro průmyslová zařízení atd. Přes mnoho kladů, kterými ocelové výrobky oplývají, ocelové plechy nevyjímaje, podléhají koroznímu napadení v mnoha běžných prostředích. Nejen z ekonomického hlediska se pak jeví jako velmi důležité, potřebné a výhodné dbát na zajištění vhodné formy protikorozní ochrany. V inženýrské praxi existuje široká paleta metod prevence korozního napadení od katodické ochrany, anodické ochrany, přísad inhibitorů až po ochranné a kovové povlaky. A právě kovové zinkové povlaky jsou extenzivně používány pro protekci ocelí a ocelových plechů [1].

### 2.1 *Metody nanášení zinkových povlaků*

Mezi nejrozšířenější způsoby nanášení zinkových povlaků patří: žárové zinkování, elektrolytické (galvanické) zinkování, žárové stříkání (metalizace), sherardizace (difúzní zinkování), mechanické zinkování a nátěr hmotami s vysokým obsahem zinku. Na několika následujících stránkách bude následovat stručné přiblížení jednotlivých metod zinkování.

#### *Žárové zinkování*

Prvopočátky této metody sahají až do 40. let 18. století, kdy francouzský chemik Paul Malouin objevil, že zinek může chránit ocel před korozi. Rozšíření praktického využití tohoto poznatku bylo umožněno o necelých sto let později, když si podal v roce 1837 rovněž Francouz Stanislas Sorel patentovou přihlášku na žárové zinkování. Krátce poté, kolem roku 1840, byly založeny první továrny, ve kterých se průmyslově pokovovaly železné předměty, ve Francii, Velké Británii a Německu [2, 3].

Důvodem pro extenzivní používání žárového zinkování byla dvojnásobná ochrana takto vytvořených povlaků. Jednak bariéra, které chránila a kompletně pokrývala základní materiál, jednak anodické rozpouštění ochranného povlaku zinku, které protektovalo substrát při poškození a diskontinuitám na povrchu. Prizmatem dnešní doby se na proces žárového zinkování pohlíží jako na metodu nabízející unikátní kombinaci vlastností jako je vysoká pevnost, tvařitelnost, nízká hmotnost, korozní odolnost a nízká cena tímto způsobem vytvářených povlaků. Shrnutí hlavních výhod a omezení žárového zinkování přináší tab. 2.1 [1, 2].

**Tab. 2.1** Shrnutí vybraných výhod a nevýhod žárového zinkování [2]

<b>Ž Á R O V É   Z I N K O V Á N Í</b>	
<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>
+ dlouhá životnost zinkových povlaků	– rozměry konstrukce jsou omezeny velikostí zinkovací lázně
+ rovnoměrný a kvalitní povlak na celém povrchu i na vnitřních a obtížně přístupných plochách	– nelze provádět na místě, vyžaduje pevné zařízení
+ při malých poškozeních chrání zinek ocel katodicky	– svařování pozinkované oceli vyžaduje náročnější postup
+ nízké vstupní náklady při výrobě	

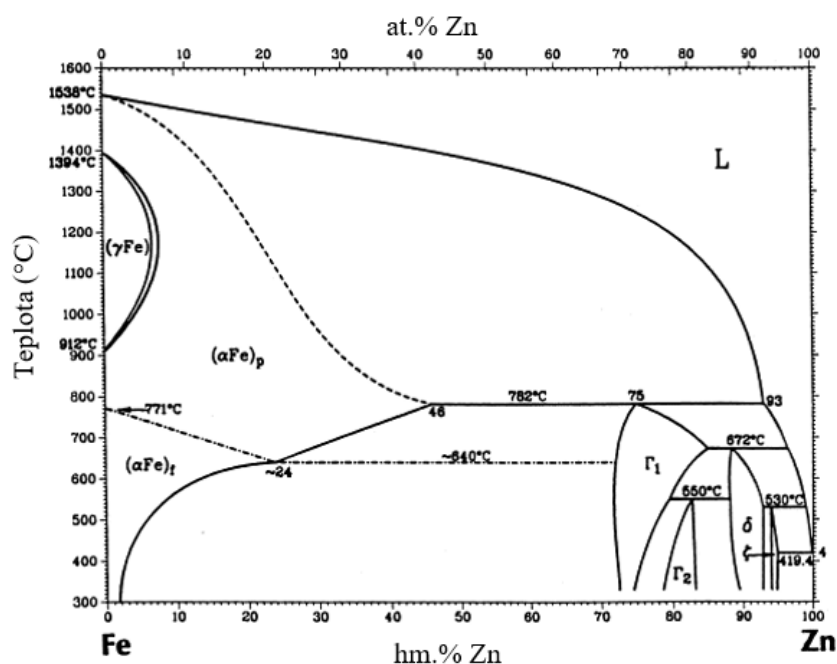
Proces žárového zinkování spočívá vlastně v ponoření ocelové součásti, která je očištěná od mastnot, okují, rzi a jiných nečistot, do roztaveného zinku. Obecně se rozeznává několik základních postupů žárového zinkování:

- ***mokrý způsob*** - jedna polovina lázně je pokryta tekutým tavidlem a pokované předměty vstupují do zinkové lázně přes tuto vrstvu tavidla, vytahovány jsou pak přes čistou hladinu
- ***suchý způsob*** - pokovované předměty jsou předem namočený do roztoku tavidla a po vyjmutí usušeny a poté ponořovány do zinkové lázně
- ***speciální způsoby: kontinuální způsob zinkování***
  - u ocelových plechů, kdy se za studena válcovaný plech ze svitků spojuje do nekonečného pásu a po očištění (odmaštění, moření) probíhá změkčovací žíhání oceli
  - v ochranné atmosféře následně pás vstupuje přímo do zinkovací lázně, kde po několika sekundách vystupuje kolmo vzhůru a prochází tzv. vzduchovými stíracími noži k přesné tvorbě tloušťky,
  - poté následují dokončovací operace (rovnání, úprava, stříhání)

Na kvalitu a růst zinkového povlaku má vliv příprava a stav pokovovaného povrchu, chemické složení zinkované ocele a složení zinkové lázně. Chemické složení základního materiálu ovlivňuje tloušťku, morfologii a ochrannou kapacitu zinkového povlaku. Mezi hlavní prvky působící na solidifikační proces patří křemík, síra, uhlík a mangan. Přítomnost kritického množství křemíku a fosforu v oceli určuje hmotnost povlaku, kritický podíl fosforu a uhlíku

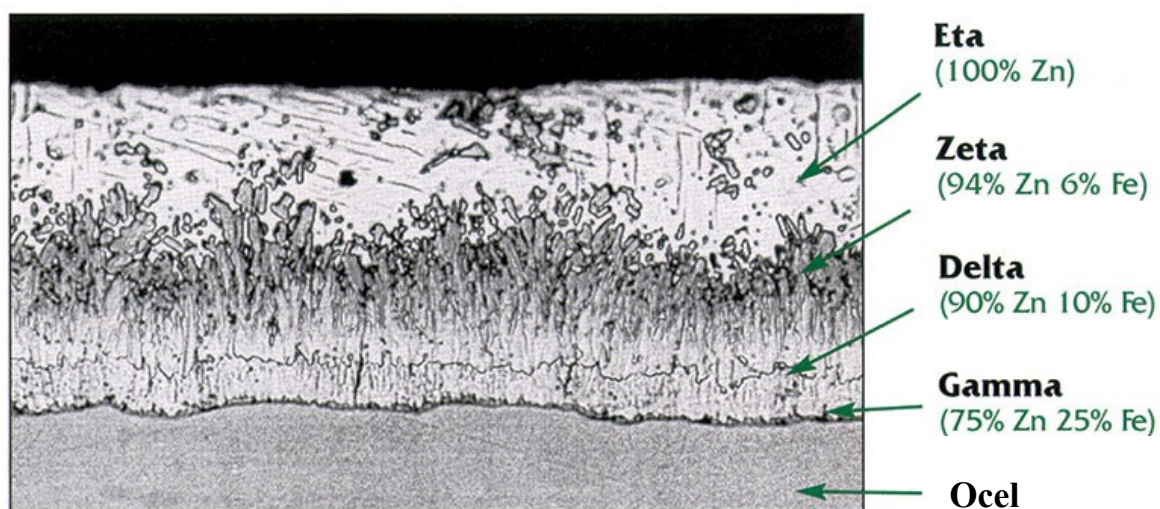
urychluje růst ochranné vrstvy, čímž zlepšuje přilnavost povlaku. Jak bylo zmíněno výše, ocelový dílec se kompletně ponoří do zinkovací lázně obsahující nejméně 98 % čistého roztaveného zinku. Teplota této lázně je při konvenčním postupu udržována mezi 440–460 °C, kdy dojde k reakci mezi železem a zinkem a na povrchu oceli se vytvoří slitina železo–zinek. Tato slitina je složená z několika vrstev Fe-Zn fází. Obsah železa v jednotlivých fázích od podkladové oceli klesá. Vlastnosti pozinkovaného povlaku může svým způsobem ovlivnit i složení zinkové lázně. Ku příkladu přidavkem hliníku lze snížit rychlost oxidace roztaveného zinku v lázni a zvýšit uniformitu kovového povlaku. Na konečné vlastnosti zinkového povlaku mohou mít rovněž vliv další prvky, které jsou přidávány do lázně jako např. hořčík, nikl, bismut, jakož i další faktory – tloušťka stěny dílce, doba ponoru atd. [1, 2, 4].

Z materiálově inženýrského hlediska se žárově zinkované povlaky skládají z heterogenní soustavy různých fází, které se formují při metalurgické reakci mezi železem a zinkem poté, co je feritický substrát ponořen do roztaveného zinku. Výskyt jednotlivých fází popisuje binární diagram Fe – Zn (obr. 2.1).



**Obr. 2.1** Binární fázový diagram Fe–Zn [5]

Po solidifikaci je povlak tvořen vnější vrstvou 100% zinku ( $\eta$ -eta vrstva) a vnitřními vrstvami skládajícími se z intermetalických fází železa a zinku – vrstva zeta  $\zeta$  (94% Zn – 6% Fe), vrstva delta  $\delta$  (90% Zn – 10% Fe) a vrstva gamma  $\Gamma$  (75% Zn – 25% Fe) viz obr. 2.2.



**Obr. 2.2** Řez žárově zinkovaným povlakem s označením jednotlivých fází [6]

Tyto intermetalické vrstvy jsou relativně tvrdší než podkladová ocel a poskytují výjimečnou ochranu proti poškození povlaku. Tabulka 2.2 přináší základní přehled a srovnání intermetalických fází žárově zinkovaných povlaků [1].

**Tab. 2.2** Charakteristika vybraných intermetalických Fe-Zn fází v žárově zinkovaných povlacích [1, 5]

	fáze $\eta$	fáze $\zeta$	fáze $\delta$	fáze $\Gamma 1$	fáze $\Gamma$
Stechiometrie	Zn	FeZn <sub>13</sub>	FeZn <sub>10</sub>	Fe <sub>5</sub> Zn <sub>21</sub>	Fe <sub>3</sub> Zn <sub>10</sub>
Hm. % železa	0	5-6	7-11,5	17-19,5	23,5-28
Krystalografická mřížka	HCP	monoklinická	hexagonální	FCC	BCC
Tvrдость HV (25 mg)	52	208	358	505	326

### Sherardizace

Proces sherardizace je pojmenován po britském metalurgovi Sherardu Osborn Cowper-Colesovi, který na počátku 20. století provedl experimenty, při nichž ohříval železo spolu se zinkovým práškem – při tom zjistil, že zinek nevytváří pouze povlak na železných předmětech, nýbrž difuzně proniká do substrátu. Dnes se proces sherardizace provádí tím způsobem, že se mořením či tryskáním očištěné ocelové předměty smísí se zinkovým prachem a pískem v bubnu a za jeho současného otáčení se provádí ohřev této soustavy na teplotu pod bodem tání zinku mezi 360–400°C. Při vyšších teplotách může docházet k tvorbě zinkových kapiček, nižší teploty prodlužují difuzní procesy. Samotný výše zmiňovaný zinkový prach by měl obsahovat nejméně 95 hm.% zinku a velikost částic by se měla pohybovat v rozmezí 5–30  $\mu\text{m}$  [2, 4, 7].



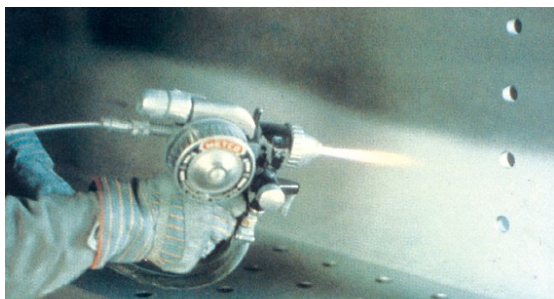
Mezi hlavní benefity vrstev nanesených pomocí sherardizace patří: uniformní difuzní povlak, nízká procesní teplota, tvrdá a velmi dobře odolná vrstva proti opotřebení, nulové riziko vodíkové křehkosti. Díky těmto pozitivním vlastnostem nachází sherardizované výrobky široké využití v mnoha aplikacích ve stavebnictví, energetice – vodních a větrných zařízeních, automobilovém nebo loďařském průmyslu. Typickými částmi vhodnými pro sherardizaci jsou upevňovací prvky jako šrouby, matice, řetězy, hřebíky nebo i části potrubí viz obr. 2.3 [7].



**Obr. 2.3** Ilustrační foto sherardizovaných předmětů [7]

### *Žárové stříkání (metalizace)*

Žárově stříkané vrstvy vznikají tím způsobem, že natavený kov je stlačeným vzduchem rozprašován na částičky o průměru 0,05 až 0,1 mm a dopadem na základní materiál dojde k mechanickému zakotvení těchto drobných částic adhezí na základní materiál. Stříkaný paprsek vytváří kvalitní povlak, pakliže je stříkán v úhlu 90–45°, optimální vzdálenost ústí hořáku od základního materiálu je 170–220 mm. K samotnému natavení kovu dochází v plynovém hořáku nebo elektrickém oblouku, kam je zinek ve formě drátu nebo prášku přiváděn [2, 4].



**Obr. 2.4** Žárové stříkání zinkem [2]

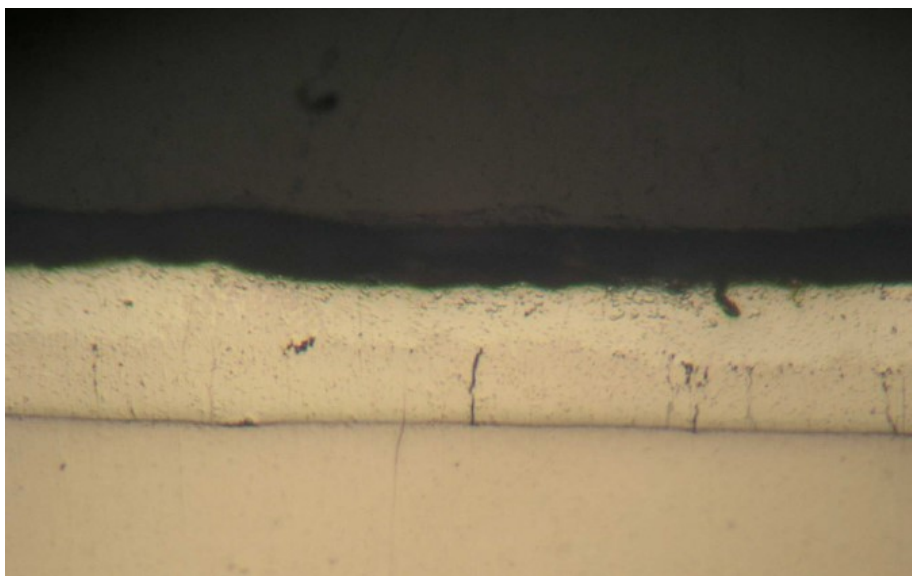
Přilnavost nastříkaného kovu vůči základu je ovlivněna především čistotou a drsností povrchu – čistoty lze dosáhnout dokonalým odmaštěním v organických nebo alkalických rozpouštědlech, popřípadě mořením v kyselině solné, drsnost povrchu se nejčastěji zvyšuje otryskáním nebo řeznými nástroji. Povrch

ošetřený žárovým stříkáním se zpravidla doplňuje organickým povlakem, jež dále podporuje korozní odolnost. Použití této metody nanášení ochranných povlaků je vhodné pro větší objekty s nepříliš komplikovaným tvarem a ideální je pro opravy žárově zinkovaných předmětů poškozených mechanickými účinky nebo svařováním (obr. 2.4) [2, 4].

### *Elektrolytické (galvanické) zinkování*

Podstatou elektrolytického – galvanického pokovování je vylučování kovových povlaků na převážně kovových základních materiálech. Vylučování kovu je založeno na elektrolýze vodných roztoků kovových solí, přičemž samotný proces probíhá při působení stejnosměrného elektrického napětí na roztoky prostřednictvím dvou elektrod. Na záporné elektrodě – katodě, kterou tvoří pokovované předměty, dochází k redukci kationtů a jeho zakotvení na kovovém povrchu. Na opačně nabitě elektrodě – anodě dochází k jejímu rozpouštění a tím se doplňuje úbytek kovu z roztoku [4].

V praxi se tedy očištěné pokovované předměty umístí do vodného roztoku zinečnaté soli (elektrolytu) a zapojí se jakožto katoda ke zdroji stejnosměrného proudu. Jako anoda se instalují desky z čistého zinku (elektrolytického zinku 99,995 hm.%). A po zapojení proudu se zinek z anody rozpouští, ve formě zinečnatých iontů putuje ke katodě, kde se vylučuje na povrchu pokovovaných předmětů. Takto vytvořené vrstvy zinku (obr. 2.5) mají zpravidla jemnozrnnou strukturu. Standardní normalizované tloušťky povlaků bývají 3, 5, 8, 12 nebo 20  $\mu\text{m}$ . Povlaky, které jsou tenčí se používají k pokovování hromadného zboží, zatímco tlustší povlaky ( $> 20 \mu\text{m}$ ) lze vytvořit na předmětech s jednoduchou geometrií. Stojí za zmínku, že tloušťka elektrolytických povlaků se na povrchu součásti může měnit – v závislosti na jejím tvaru a umístění anod, proto se v některých případech používají tzv. pomocné anody. Aby byly elektrolyticky pozinkované předměty chráněny během skladování a dopravy, přistupuje se někdy k jejich chromátování. Použití elektrolyticky nanesených povlaků je rozmanité – od spojovacího materiálu, elektrotechnických součástí až po spotřební zboží. V některých případech slouží jako náhrada ozdobně ochranných povlaků zejména pro lehce a středně agresivní prostředí – např. vnitřní vybavení vozidel atd. [2, 4].



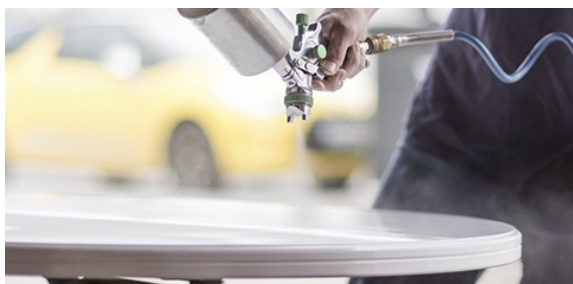
**Obr. 2.5** Řez povlakem galvanicky naneseného zinku [8]

### *Mechanické zinkování*

Mechanické zinkování se provádí v bubnu, do kterého se očištěné ocelové předměty nasypou spolu se skleněnými kuličkami, zinkovým prachem a chemickými aktivátory. Následně dochází k omílání součástí v bubnu a zinek se při tom pomocí skleněných kuliček navaluje na jejich povrch. Po dosažení požadované tloušťky povlaku se součásti vyjmou z bubnu, tuto tloušťku je možné regulovat podle množství přidaného zinku do soustavy a dobou zinkování. Obecně se tloušťka vrstev dosažených mechanickým zinkováním pohybuje kolem 10–15  $\mu\text{m}$  a je rovnoměrná a homogenní i na dílech se složitější geometrií. Tato metoda je vhodná pro tepelně zpracované, vytvrzené oceli – předměty menších rozměrů např. pružiny [2].

### *Nátěrové hmoty s dominantním obsahem zinku*

Za nátěrové hmoty s dominantním obsahem zinku se obecně považují ty, ve kterých je mezi 65 až 69 hm.% zinkového prachu v nátěrové hmotě nebo více než 92 hm.% v suchém



**Obr. 2.6** Nanášení zinkové nátěrové hmoty stříkáním [10]

nátěrovém filmu. Tyto nátěrové hmoty obsahující zinkový prach bývají formulovány na bázi anorganického nebo organického pojiva. Na povrch základního materiálu, který je suchý a očištěný, se aplikují stříkáním (obr. 2.6) nebo nanášením štětcem. Tento způsob ochrany se využívá pro ocelové předměty jakékoli velikosti

a tvarů zejména v případech poškození povlaku žárového zinku. Mezi nevýhody se počítá špatná uniformita povlaku (zvláště v rozích a hranách) a zvýšené požadavky na čistotu povrchu [2, 9].

Závěrem je uvedeno porovnání vybraných vlastností různých typů zinkových povlaků (obr. 2.7).



**Obr. 2.7** Grafické porovnání různých zinkových povlaků a nátěrové hmoty s vysokým obsahem zinku. Pozn. mechanické zinkování není v porovnání uvedeno, nejspíše se dá porovnat s elektrolytickým zinkováním [2]

### 3. LASEROVÉ ŘEZÁNÍ

Řezání pomocí laseru lze bezpochyby zařadit mezi progresivní způsoby dělení materiálů, při kterém dochází k unikátnímu působení člověka na materiál ve výrobním procesu. Ve srovnání s konvenčními tavnými metodami řezání vyniká řezání laserem v aplikacích vyžadujících vysokou produktivitu a vysokou kvalitu řezných hran, a navíc produkuje minimální množství odpadu. Podle požadovaných vlastností lze zvolit optimální mechanismus řezání: pokud je hlavním kritériem produktivita procesu, je nejlepší volbou tavné řezání v atmosféře kyslíku (oxidační), pokud se klade větší důraz na kvalitu řezné hrany, hodí se použití tavného řezání v atmosféře inertního plynu. Přehled základních mechanismů laserového řezání přináší tab. 3.1.

**Tab. 3.1** Přehled mechanismů laserového řezání pro různé technické materiály (vhodná metoda pro daný typ materiálu je označena • [11])

Materiál	Tavné řezání v inertním plynu	Tavné řezání oxidační	Sublimační řezání	Chemická degradace	Scribing
Slitiny železa	•	•	—	—	—
Neželezné slitiny	•	•	—	—	—
Polymery	•	•	•	—	—
Keramika	•	—	—	—	•
Skla	•	—	—	—	•
Elastomery	—	—	—	•	—
Kompozity	•	—	—	•	•

Obecně se dá konstatovat, že laserové řezání představuje nejlepší kombinaci produktivity a kvality u homogenních materiálů s tloušťkou pod 3 mm v případě provozní kapacity v rozsahu 16 hodin za den. Získaná data ukazují i to, že pro řadu technických materiálů je možné i při relativně levném zdroji laseru 1-2 kW CO<sub>2</sub> dosáhnout rychlosti řezu několik metrů za minutu. Při výzkumech a vývoji této metody bylo dosaženo pokroku a zlepšení v mnoha parametrech, přičemž obecným trendem je zlepšení kvality řezných hran za současného udržení vysokých řezných rychlostí [11, 12].



### 3.1 Charakteristika procesu řezání laserem

Proces laserového řezání se vyznačuje vysokou produktivitou. Navíc umožňuje zajištění vysoké přesnosti řezu (s tolerancí mezi 0,05 a 0,1 mm), vyvarování se poškození povrchu a rychlé a efektivní výroby. Automatizované laserové systémy maximalizují efektivní spotřebu řezaného materiálu. Náklady na pomocný obslužný personál jsou nízké, což znamená, že vstupní investice na pořízení strojního vybavení se mohou vrátit již za jeden rok.

Je to také proces, který je šetrný k životnímu prostředí, neboť je tichý, neplýtvá přírodními zdroji a neprodukuje škodlivé plyny a zplodiny. Mezi hlavní nevýhody patří vysoké vstupní investiční náklady na vybavení, provoz a údržbu zařízení. Proto je vždy potřeba provést analýzu a porovnání výhodnosti laserového řezání s konvenčními technikami řezání. Shrnutí výhod a nevýhod laserového řezání jak z pohledu ekonomického a provozního, tak z pohledu technického přináší tab. 3.2 [11, 12].

**Tab. 3.2** Shrnutí výhod a nevýhod při řezání laserem [12]

L A S E R O V É   Ř E Z Á N Í	
Výhody	Nevýhody
+ vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálu	– vysoké investiční a provozní náklady
+ řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, tvarů s ostrými úhly; výroba komplexních obrysových dílů	– omezení tloušťky materiálu; konstrukční ocel: 25 mm, vysokolegovaná ocel: 15 mm, hliník: 10 mm
+ pravoúhlá řezná hrana	– nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku
+ velmi malé přivedené teplo, žádné deformace obráběného předmětu	– omezení stability paprsku u řezání konstrukční oceli s normálním obsahem Si a P
+ vysoká řezná rychlost	– snížení stability procesu u řezání lesklých povrchů
+ lze řezat téměř všechny technické materiály	– menší účinnost (CO <sub>2</sub> laser max. 25%)

### 3.2 *Metody řezání laserem*

Existuje mnoho různých mechanismů, které se uplatňují při laserovém řezání. Obecně rozeznáváme 5 základních metod: tavné řezání v inertním plynu, tavné řezání v aktivním plynu (oxidační), sublimační, chemická degradace a scribing. Za zmínku stojí rovněž metoda tzv. trepanace, při které dochází k vyřezání děr pomocí jednoho z výše jmenovaných mechanismů vedením světelného svazku kolem předdefinované oblasti. Tato metoda je používána v případech, kdy průměr požadovaného otvoru je značně větší než průměr laserového svazku, a dovoluje také vytvářet zkosené hrany. Materiál je nejprve propíchnut ve středu otvoru a řez je poté veden směrem k okraji [11].

#### *Tavné řezání v inertním plynu*

Spolu s tavným řezáním oxidačním je tato metoda nejrozšířenější a nejpoužívanější. Je založena na lokálním natavení materiálu, přičemž vzniklá tavenina se odděluje od základního materiálu proudem čistého inertního plynu. Tato technika se používá pro materiály, jež se roztaví dostatečně rychle po zahřátí laserovým paprskem. Jako pomocný plyn se v případě, že není tolerován žádný stupeň oxidace volí obecně dusík, pro materiály, ve kterých se mohou tvořit škodlivé křehké nitridy, je vhodnější použití argonu nebo helia. Pro odstranění roztaveného materiálu a zabránění jeho nechtěné solidifikace je doporučováno užití vysokého tlaku plynu (nad 1 MPa). Charakteristickým rysem takto laserově ošetřených řezných hran může být přítomnost pravidelných striací, které připomínají cyklickou povahu řezného procesu. Mezi hlavní výhody této techniky patří vysoká kvalita řezných hran (nezoxidované řezy kovových materiálů), nevýhoda je spatřována v nižších řezných rychlostech v porovnání s tavným řezáním oxidačním [11, 12].

#### *Tavné řezání oxidační*

Od tavného řezání v inertním plynu se liší oxidační řezání pouze použitím kyslíku (případně vzduchu) jako řezného plynu. Vzájemným působením kyslíku a nataveného povrchu vzniká exotermní reakce, jejíž následkem je další ohřátí materiálu. V důsledku tohoto jevu lze dosáhnout u ocelí vyšších řezných rychlostí, na druhou stranu je řez horší kvality – širší, s vyšší drsností a s větším tepelně ovlivněnou zónou. Obecně platí, že tento způsob je nevhodný pro zhotovování ostrých geometrických tvarů, malých otvorů apod. [12].

### *Sublimační řezání*

Tato metoda se v dnešní době příliš nepoužívá a je určena především pro materiály, které nelze jednoduše natavit. Je při ní důležité zajistit vysokou hustotu energie laserového paprsku, která může být až 100x větší než u tavného řezání v inertním plynu. Podstatou je rychlé ohřátí materiálu na teplotu, při které dochází k odpařování materiálu v místě požadovaného řezu. Řezy vzniklé touto metodou vynikají vysokou kvalitou, naopak řezná rychlost je nízká [11, 12].

### *Chemická degradace*

Mechanismus chemické degradace závisí na působení laserového paprsku, který rozkládá chemické vazby a vytváří nové sloučeniny, a je důležitý pro laserové řezání dřeva, termosetů, elastomerů a některých kompozitů. Řezné rychlosti nabývají nižších hodnot než u tavného řezání, avšak řezné hrany mají relativně vysokou kvalitu, ačkoli mohou někdy vyžadovat dočištění [11].

### *Scribing*

Cílem této metody je vytvoření drážek nebo série slepých otvorů na povrchu materiálu, které slouží k místnímu zvýšení napětí, a díky nimž může být materiál zlomen podél definované čáry při následném ohybu. Tento mechanismus se používá pro některé druhy keramiky, skel nebo kompozitů a umožňuje vysokou produktivitu výroby [11].

## **3.3 Konstrukce laseru**

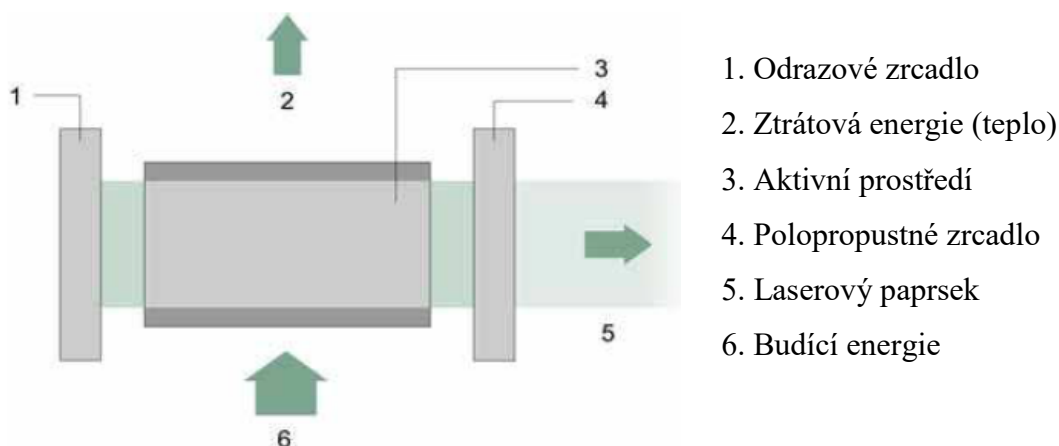
Každá soustava laseru se skládá ze tří základních částí: aktivní prostředí (aktivní látka), budící (čerpací) zdroje a rezonanční systém.

Vhodným buzením aktivní látky se docílí tzv. inverse populace. Jde o nerovnovážný stav, při kterém existuje více atomů na vyšších energetických hladinách než na nižších. Uvnitř aktivního prostředí je inverse populace nezbytnou podmínkou pro to, aby docházelo k zesilování světla. Buzení (čerpání) může být optické (dioda či výbojka), elektrické (proud nebo výboj), chemické (chemická reakce produkující ionty nebo molekuly).

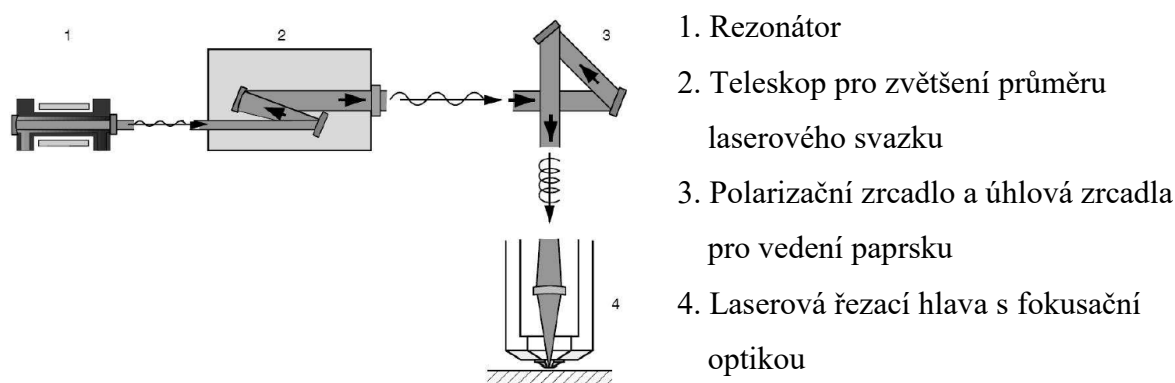
Pod aktivním prostředím si lze představit látku – pevnou, plynnou nebo kapalnou, která je nasycena více atomy na vyšších energetických hladinách. Takovéto atomy mohou dále

emitovat dvojnásobnou světelnou energii. Lze konstatovat, že aktivní prostředí je nejdůležitější jednotkou laserového zařízení, protože v něm vzniká stimulovaná emise.

Poslední částí je rezonátor (obr. 3.1), což je vlastně optická dutina, do níž je vložena aktivní látka. Obvykle je rezonátor tvořen dvěma zrcadly – jedno bývá odrazové a druhé polopropustné a zvenčí je opatřeno chladičem. Ilustrační schéma konstrukce laseru je zobrazeno na obr. 3.2 [13].



**Obr. 3.1** Konstrukce rezonátoru laseru [13]

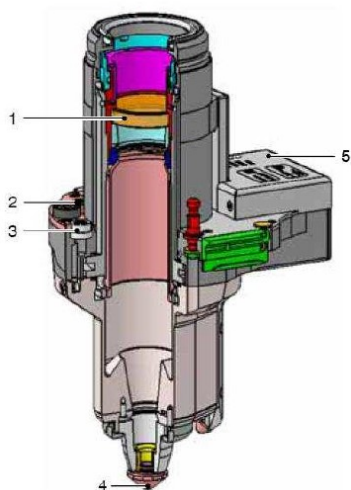


**Obr. 3.2** Ilustrační schéma konstrukce laseru [13]

### Uspořádání řezací hlavy laseru

Řezná hlava obsahuje komoru utěsněnou na horní ploše zaostřovací čočkou, na které jsou připojeny tryska a další části (obr. 3.3). Čočka musí být transparentní pro danou vlnovou délku příslušného laserového paprsku. V případě nedodržení této podmínky dojde k absorpci laserového paprsku a ohřívání čočky, což může vést k jejímu poškození. Plyn je vstřikován do

komory při daném tlaku a vystupuje přes hrot danou rychlostí a v závislosti na geometrickém tvaru trysky. Podle uspořádání je možné, aby se řezná hlava pohybovala na velké vzdálenosti, nebo se pohybuje řezaný materiál a řezná hlava zůstává zafixována [11, 13].



1. Zinek-selenidová čočka
2. Přívod vzduchu pro chlazení
3. Přívod asistenčního řezacího plynu
4. Řezací tryska
5. Elektronika laserové hlavy

**Obr. 3.3** Příklad konstrukce řezací hlavy laseru [13]

### 3.4 Základní parametry zpracování

#### *Pracovní plyn*

Pracovní plyn má hned několik základních funkcí během laserové řezání. Úkolem inertního plynu (např. dusíku) je vyhnání roztaveného materiálu bez toho, aby došlo k jeho solidifikaci ve formě kapiček na řezaném materiálu. Aktivní pracovní plyn (např. kyslík) se podílí na exotermické reakci materiálu. Při řezání tlustých profilů s vysokou intenzitou paprsku pomáhá pracovní plyn potlačovat tvorbu plasmy. A konečně se proudem plynu omezuje tloušťka tepelně ovlivněné zóny. Bez asistence pracovního plynu by bylo nemyslitelné využití laseru pro řezání při vysokých rychlostech s dobrou kvalitou řezu pro šířky materiálu větší než několik desítek milimetrů. Obecně lze konstatovat, že důležitost a význam pomocného plynu roste se vzrůstající tloušťkou materiálu [11].

Nejrozšířenějším pracovním inertním plynem je dusík, a to zejména z důvodu jeho nízké finanční náročnosti. Na čistotu dusíku se nekladou přehnané nároky, obecně se pohybuje nad 99,8 %. Používá se v případech, kdy je důležité zabezpečení vysoké kvality řezných hran pro materiály na bázi železa – korozivzdorné oceli, nebo na bázi niklu. Pro titanové materiály je obvyklou volbou použití argonu, neboť brání tvorbě oxidů a křehkých nitridů titanu [11].



Kyslík se jako pracovní plyn používá při zpracování nízkouhlíkových nebo korozivzdorných ocelí, kde je podstatná vysoká rychlost řezu, zatímco kvalita řezů má druhořadý význam. Kolem 50 % energie potřebné pro řezání je tvořeno oxidační reakcí, zbylou část zajišťuje energie laserového paprsku. Čistota plynu hraje zásadní roli, neboť například nízkouhlíková ocel o tloušťce 1 mm může být uřezána o 30 % rychleji při čistotě kyslíku 99,9 nebo 99,99 % ve srovnání se standardní čistotou 99,7 % [11].

### *Tryska*

Konstrukce trysky a zejména konstrukce otvoru určuje tvar vycházejícího proudu a tím i kvalitu řezu. Existuje několik různých geometrických uspořádání v závislosti na aplikaci v technické praxi (obr. 3.4). Průměr otvoru trysky bývá v rozmezí 0,8 až 3 mm a je zvolen podle materiálu. Příliš malá tryska vytváří problémy v zarovnání a lokalizaci plynu, což vede k hrubým hranám. Na druhou stranu tryska, která je příliš velká, nezajišťuje dostatečný tok plynu a vede k jeho vysoké spotřebě [11].



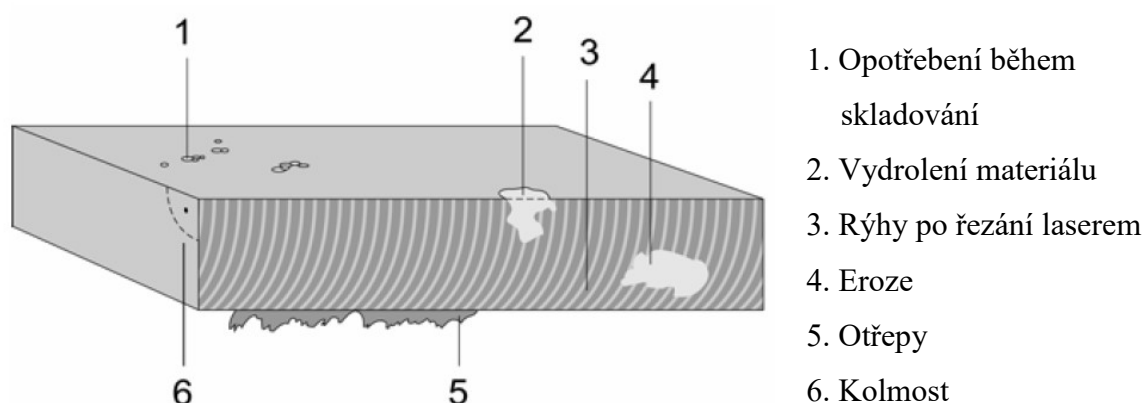
**Obr. 3.4** *Nejběžnější geometrická uspořádání trysek pro laserové řezání [11]*

### *Vzdálenost odstupu*

Dalším důležitým parametrem je vzdálenost mezi tryskou a řezaným materiálem – vzdálenost odstupu. Tato vzdálenost ovlivňuje tok plynu, což má přímou vazbu na kvalitu řezu. Pokud je vzdálenost odstupu menší než 1 mm, může dojít ke kolísání tlaku. Kratší vzdálenost odstupu zajišťuje stabilnější podmínky pro řezání [11].

### 3.5 Vyhodnocení kvality řezání laserem

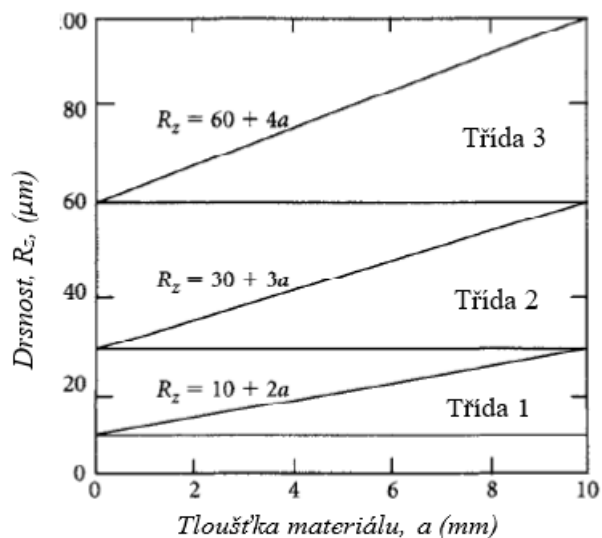
Mezi kritéria hodnocení kvality řezné plochy, která lze vyhodnotit pouhým okem, lze zařadit například vydrolení materiálu, rýhy po řezání nebo otřepy (obr. 3.5). K přesnějšímu vyhodnocení lze využít měření drsnosti, kolmosti nebo šířky mezery řezné spáry [11].



**Obr. 3.5** Kritéria hodnocení kvality řezné plochy [11]

#### Drsnost

Průměrná hodnota drsnosti  $R_z$  se používá ke zhodnocení kvality řezu. Délka, na kterém se toto měření provádí, je 15 mm a je rozdělena na pět částí. Vzdálenost mezi nejvyšším bodem a nejnižším bodem povrchu je určena pro všech pět jednotlivých měření. Hodnota  $R_z$  je pak definována jako průměr z těchto pěti vzdáleností. Kvalitu drsnosti řezu je možné rozdělit do několika tříd (obr. 3.6) [11].



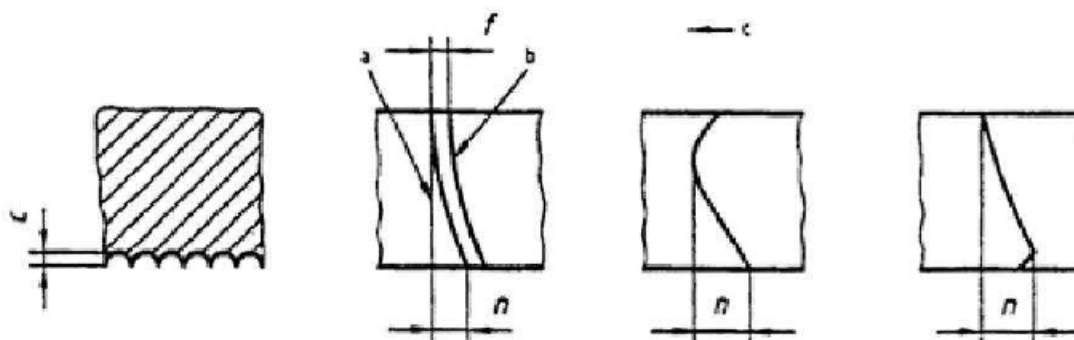
**Obr. 3.6** Třída kvalit laserového řezání v závislosti na drsnosti hrany řezu [11]

### Otřepy

Otřepy se tvoří zpravidla na spodní hraně řezu. Mohou mít tvar prodloužených kapiček nebo drsný vláknitý vzhled. Během řezání mohou být odstraněny pomocí proudu plynu ze spodní strany materiálu. Případně se odstraňují mechanicky po řezání [11].

### Skluz

Skluz je definován jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání (obr. 3.7).



**Obr. 3.7** Skluzová rýha [11]

- a... referenční přímka
- b... skluzová rýha
- c... směr posuvu
- n... vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy
- C... velikost otřepů
- f... vzdálenost mezi dvěma body skluzových rýh

### Pitting

Důlky se tvoří na řezné hraně v důsledku nepravidelného toku taveniny během laserového řezání s nedostatečně optimalizovanými parametry. Vznikají zvláště při nižších řezných rychlostech a jsou popisovány velikostí a počtem [11].

### **3.6 Materiály pro laserové řezání**

#### *Uhlíkovo-manganové oceli*

Uhlíkovo-manganové oceli bývají standardně laserově řezány v kyslíkové atmosféře. Pokud je kvalita řezu důležitější než řezná rychlost, volí se použití inertního plynu (např. dusíku). Oceli s vyšším obsahem uhlíku jsou obecně řezány snadněji než ty s nižším obsahem uhlíku.

Pozinkované ocelové plechy lze z hlediska laserového řezání rozdělit do dvou skupin: na galvanicky nanesené povlaky a na žárově nanesené povlaky. Tenké galvanicky nanesené vrstvy nepředstavují při laserovém řezání žádný problém. Žárově nanesené povlaky s obvykle tlustší zinkovou vrstvou reagují v přítomnosti kyslíku exotermicky a mohou podnítit produkci škodlivých zinkových výparů [11].

#### *Nízkolegované oceli*

Nízkolegované oceli typu např. AISI 4140 nebo 8620 vykazují velmi podobné chování při laserovém řezání jako uhlíkovo-manganové oceli. Platí, že čím menší obsah nečistot obsahují, tím se kvalita řezu zvyšuje [11].

#### *Korozivzdorné oceli*

Korozivzdorné vysokolegované oceli mohou být laserově řezány jak pomocí tavného řezání v inertní atmosféře, tak oxidačním řezáním. Tento typ ocelí má relativně nízkou tepelnou vodivost, což umožňuje řezání při poměrně vysokých řezných rychlostech [11].

## 4. KOROZE

Korozi lze definovat jako samovolně probíhající proces znehodnocování materiálů působením okolního prostředí, přičemž reakce nebo děje, které jsou příčinou korozního napadení materiálů, jsou fyzikálně chemické povahy. Podstatou samovolného průběhu korozního procesu je pak to, že korozní soustava, materiál a prostředí směřují do pravděpodobnějšího neuspořádanějšího stavu s menší volnou entalpií. Ačkoli by tedy samovolnost tohoto děje sváděla k názoru, že jde o nezvládnutelný přírodní jev, opak je pravdou, a právě možnost zastavení či zpomalení průběhu koroze je úkolem pro korozní vědu a techniku [4, 14].

### *Základní rozdělení koroze*

V závislosti na mechanismu koroze lze rozlišit:

• <b>elektrochemickou korozi</b>	– v prostředích s přítomností elektrolytu (ve vodných roztocích, vlhkých půdách apod.),
• <b>chemickou korozi</b>	– zejména v suchých plynech a nevodivých kapalinách [15].

Podle typu korozního poškození lze rozlišit:


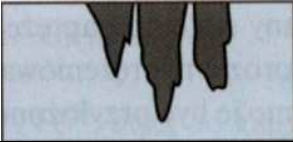


• <b>obecnou/rovnoměrnou korozi</b>	– může mít pravidelný, nebo nepravidelný průběh a vyskytuje se na celém povrchu kovu,
• <b>lokalizovanou korozi</b>	– např. bodová koroze, štěrbinová koroze [15].

Na základě prostředí, se kterým materiál interaguje rozpoznáváme základní typy:

- **atmosférickou korozi,**
- **korozi ve vodách,**
- **korozi v plynech,**
- **půdní koroze.**

Tab. 4.1 zobrazuje vybraná typická korozní poškození a doplňuje je o stručnou charakteristiku.

**Tab. 4.1** Typická korozní poškození [15]

<p><b>ROVNOMĚRNÁ KOROZE</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zasahuje celý povrch kovu nebo slitiny,</li> <li>– častá u materiálů s nízkou korozní odolností,</li> </ul>
<p><b>PITTING</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– je typem lokální koroze,</li> <li>– důlky se mohou tvořit např. na hranicích zrn,</li> <li>– pro iniciaci je potřeba minimální potenciál (perforace),</li> </ul>
<p><b>MEZIKRYSTALOVÁ KOROZE</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– je to selektivní oxidace kovu podél hranic zrn,</li> <li>– typická je absence korozních produktů na povrchu materiálu,</li> <li>– často se vyskytuje v austenitických a feritických ocelích (odolnost se posiluje zvýšením chromu v tuhém roztoku),</li> </ul>
<p><b>KOROZNÍ PRASKÁNÍ</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>– vzniká současným působením korozního prostředí a (tahového) napětí,</li> <li>– napětí vyvolávající korozní praskání je nižší, než je mez kluzu materiálu,</li> </ul>

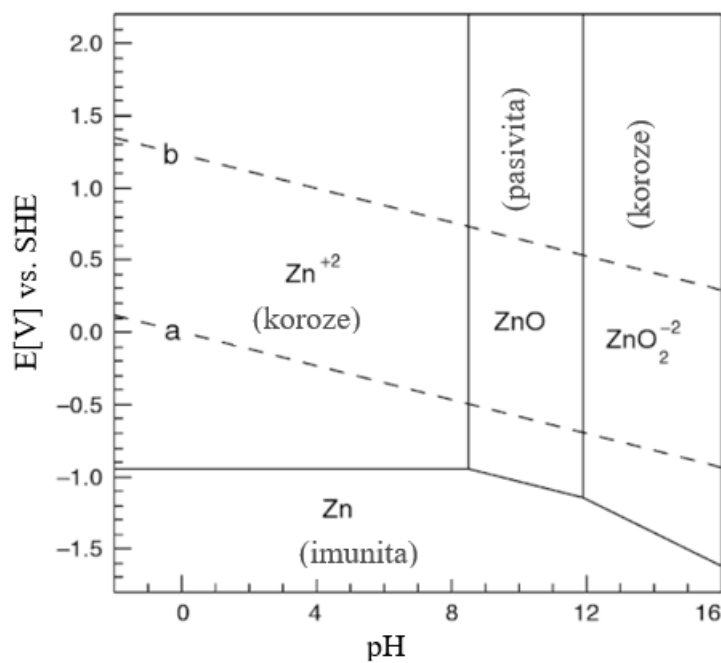
#### 4.1 Korozní vlastnosti zinku

Zinek je světlý, šedivý a snadno tvárný kov s hustotou  $7,14 \text{ g/cm}^3$ . V pořadí zastoupení jednotlivých prvků v přírodě zaujímá zinek 24. místo a široce rozšířen a používán je i v mnoha odvětvích průmyslu – díky své dobré kujnosti, slévateľnosti a korozní odolnosti v atmosférických podmínkách. Korozní odolnost zinku spočívá ve schopnosti tvorby ochranných povlaků skládajících se z korozních produktů, které brání postupu koroze. Růst korozních produktů je sám o sobě komplexní proces silně sensitivní na střídání suchých a vlhkých cyklů, a tudíž velmi závislý na klimatických podmínkách [2, 16].

Pro získání informací o korozních termodynamických vlastnostech zinku pro mnohá prostředí lze použít diagramy  $E - \text{pH}$ , známé jako Pourbaixe diagramy. Tyto diagramy znázorňují termodynamicky stabilní stavy kovového materiálu v závislosti na pH a na potenciálu, jmenovitě oblasti koroze, imunity a pasivity. Z diagramu lze určit změny pH prostředí potřebné k převedení rozpustných korozních produktů v nerozpustné, a naopak. Diagramy rovněž naznačují změny potenciálu potřebné k převedení korozních produktů na



nerozpustné produkty o vyšším mocenství a pro jejich redukci na kov. Pourbaixe diagram pro zinek je velmi podobný jako pro hliník, neboť zinek stejně jako hliník podléhá rozpouštění v kyselých roztocích (ionty  $\text{Zn}^{2+}$ ) a roztocích zásaditých ( $\text{ZnO}_2^{2-}$ ) viz obr. 4.1 [17, 18].



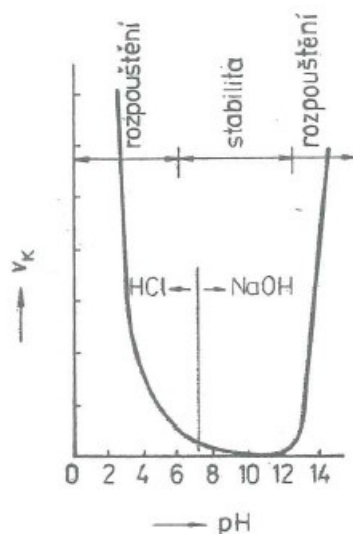
**Obr. 4.1** Pourbaix diagram pro zinek při 25 °C [18]

Kinetika koroze kovu – zinku vystaveného atmosféře může být popsána pomocí empirické rovnice:

$$D = At^n \quad (1)$$

kde  $D$  představuje úbytek tloušťky v  $\mu\text{m}$ ,  $t$  je doba expozice (nejčastěji v měsících),  $A$  a  $n$  jsou konstanty. Hodnota konstanty  $n$  může reflektovat efektivitu ochrany korozních produktů před dalším postupem koroze;  $n > 1$  naznačuje, že vznikající korozní produkty nemají protektivní účinek a korozní proces postupuje zrychleně;  $n < 1$  znamená, že koroze je zpomalována díky tvorbě ochranných vrstev korozních produktů; čím menší je hodnota konstanty  $n$ , tím větší je zpomalující efekt [16].

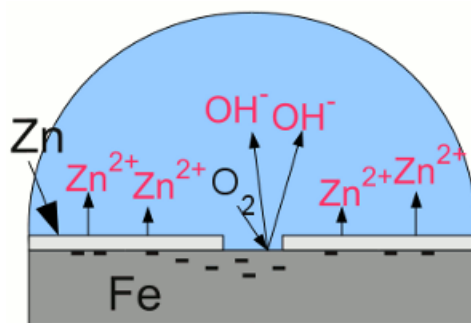
Obr. 4.2 ukazuje, že rychlost koroze zinku je závislá i na pH prostředí.



**Obr. 4.2** Závislost rychlosti koroze zinku na pH prostředí [19]

## 4.2 Korozní vlastnosti zinkových povlaků

V praxi je protekce před poměrně velkou korozní rychlostí většiny typů nelegovaných ocelí realizována pomocí ochranných zinkových povlaků, chránících základní materiál dvojím způsobem: bariérovým působením bránícím přístupu kyslíku a vlhkosti k povrchu oceli; katodickou ochranou v místech porušení jako bývají škrábance, odloupnutí, střížné hrany atd. Schéma korozní buňky vytvořené v důsledku poškození zinkového povlaku ilustruje obr. 4.3.



**Obr. 4.3** Schéma korozní buňky vytvořené v případě poškození ochranného zinkového povlaku [20]

Vzhledem k umístění zinku v elektrochemické řadě kovů mají zinkové vrstvy na ocelích charakter anodických povlaků, které mohou povrch oceli chránit katodicky (díky

anodickému rozpouštění zinku). Navíc se vnější zinková vrstva pokrývá korozními produkty, jimiž se chrání proti další korozi [2, 4, 21, 22].

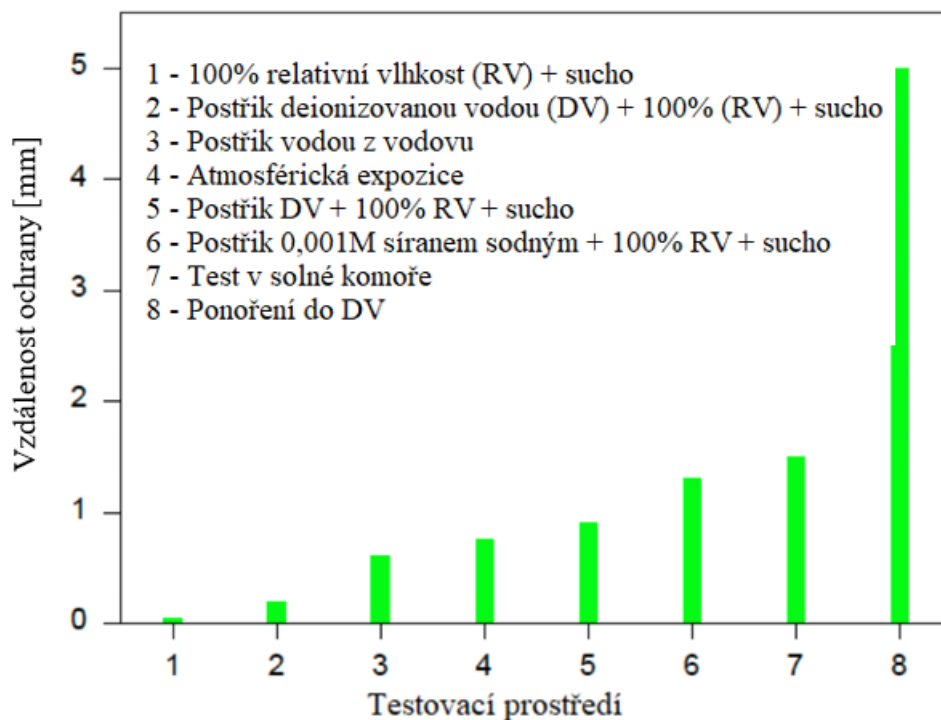
#### 4.2.1 Koroze v oblasti hrany řezu (galvanická koroze)

Galvanická koroze oceli ošetřené zinkovým povlakem vzniká v místech, ve kterých je základní ocelový materiál obnažen, tj. např. řezné hrany, rýhy nebo škrábance. V těchto místech je ocel katodicky chráněna, zatímco okolní zinkový povlak se anodicky rozpouští. Tento děj je možný díky tomu, že zinek je elektronegativnější než ocel, viz elektropotenciálová řada kovů a slitin na tab. 4.2. Platí, že čím větší je plošný podíl anody (zinku) ke katodě (oceli), tím lepší ochrana je zajištěna, neboť je dostatečný počet elektronů, aby se zabránilo oxidaci katody. Nutno podotknout, že vytvoření takového typu galvanického článku je podmíněno přítomností elektrolytu (elektrického obvodu) [23].

**Tab. 4.2** Elektropotenciálová řada vybraných kovů a slitin [24]

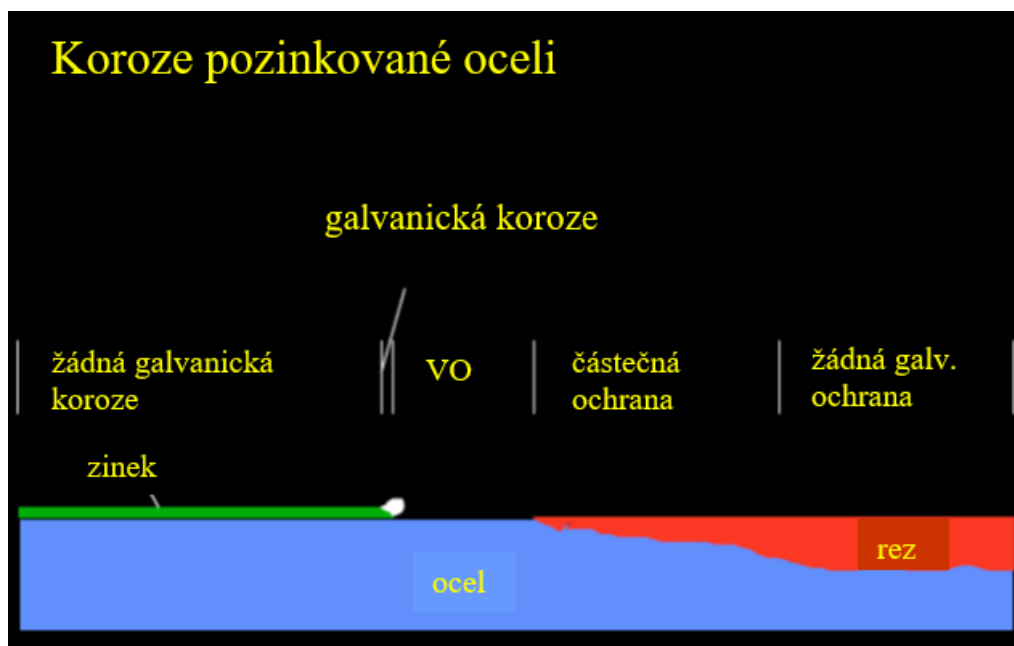
Elektropotenciálová řada kovů a slitin	
(Elektronegativnější)	
Hořčík	
Zinek	
Hliník	
Kadmium	
Železo/ocel	
Korozivzdorná ocel	
Olovo	
Cín	
Měď	
Zlato	
(Elektropozitivnější)	

Otázkou zůstává, jak velkou část oceli – základního materiálu je zinek schopen protektovat, jinými slovy, jak velkou ochrannou vzdálenost zinek nabízí. Hodnota ochranné vzdálenosti pro dané geometrické uspořádání závisí na specifičnosti prostředí (obr. 4.4) [23].



**Obr. 4.4** Vzdálenost ochrany zinku na oceli pro různá prostředí (platí pro určitou tloušťku zinku a dobu expozice) [23]

Obr. 4.5 zobrazuje schematicky fenomén vzdálenosti ochrany. Vzdálenost ochrany zinku stoupá se zvyšující se vodivostí a hustotou elektrolytu. Hodí se poznamenat, že galvanická reakce mezi zinkem a ocelí při podmínkách atmosférické expozice má dosah jen na velmi krátkou vzdálenost [23].



**Obr. 4.5** Schéma vzdálenosti ochrany (VO) od povlaku zinku na oceli [23]

Zatímco přítomnost korozních produktů na pozinkovaných pleších může být z estetického hlediska neakceptovatelná, koroze nemusí znehodnotit strukturní integritu součástí. Pro aplikace, ve kterých jsou v potaz brány i estetické požadavky, je potřeba tyto nároky zohlednit při designu konstrukce. Podle některých zdrojů se uvádí, že do doby spotřebování zinku v oblasti hrany řezu se míra koroze a korozních produktů změní velmi málo – pro tenké plechy ( $<1$  mm) může zůstat řezná hrana bez korozního napadení po celou dobu životnosti komponenty pro většinu prostředí. Obr. 4.6 zachycuje relativně tlustý pozinkovaný dílec s viditelnou korozí na hraně řezu, která s největší pravděpodobností nikdy nezhorší funkčnost během celé doby životnosti [23].



**Obr. 4.6** Koroze v oblasti hrany řezu na pozinkované součásti [23]

#### 4.2.2 Fretting

Fretting nebo také vibrační opotřebení či vibrační koroze se popisuje jako korozní poškození na povrchu kontaktních ploch. Toto poškození nastává při zatížení a za přítomnosti opakovaného relativního pohybu povrchu, vyvolaného například vibracemi. Fretting může vést k předčasnému opotřebení částí nebo může také vyvolat vznik trhlin, které způsobí únavové poškození. V elektrických komponentách může fretting zvýšit elektrický odpor a zavinit poruchy v obvodech. Vzhled frettingem zasažených povrchů zobrazuje obr. 4.7 a obr. 4.8. Na těchto snímcích jsou známky frettingu patrné v blízkosti hran a jejich výskyt byl zaznamenán i na protějšcích površích [25, 26].



**Obr. 4.7** Ilustrační snímek frettingu na pozinkovaném plechu [25]



**Obr. 4.8** Detailnější pohled na pravou stranu obr. 4.7 [25]

Známky frettingového poškození mívají zpravidla podobu černých skvrn a jejich původ je připisován extrémně malým částicím oxidu zinečnatého. Ačkoli oxid zinečnatý, který vzniká při korozi zinku v atmosférickém prostředí, mívá bílý vzhled, v případech frettingového zasažení je černý, neboť se jedná o jeho odlišnou variantu. Předpokládá se, že tento oxid je černý pro jiné optické vlastnosti, nebo pro způsob, jakým jsou velmi jemné oxidické částice spojené k povrchu zinku. Opatření, která je možná provést k minimalizaci koroze způsobené frettingem, je hned několik – od mazání s oleji nebo mazivy s nízkou viskozitou, optimalizace povrchové drsnosti vedoucí ke změně koeficientu tření, omezení vibrací, snížení zatížení na nosných plochách apod. I když ne všechna z těchto možností jsou v praxi na pozinkované plechy aplikovatelná, do jisté míry může většina z nich pomoci v prevenci před frettingem [25].

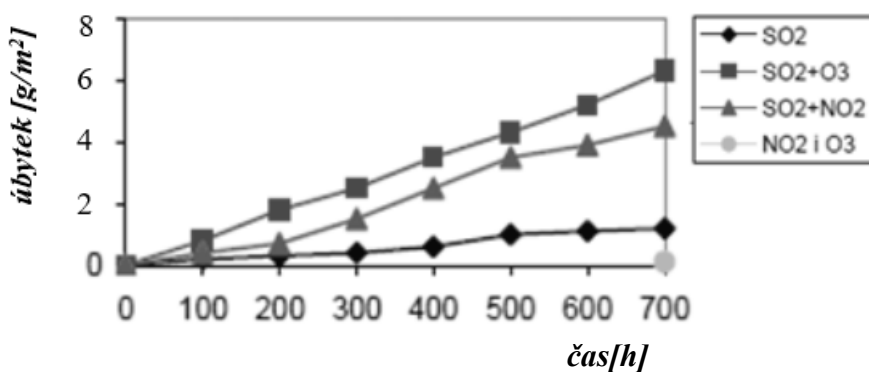
### 4.3 Korozní vlastnosti zinkových povlaků v různých prostředích

Korozní vlastnosti a stupeň korozní odolnosti zinkových povlaků závisí mj. na charakteru prostředí, kterému jsou tyto povlaky vystaveny. Na několika následujících stránkách jsou přiblíženy hlavní aspekty nejvýznamnějších korozních prostředí.

#### 4.3.1 Atmosférická koroze

Materiály opatřené zinkovými povlaky odolávají koroznímu napadení v atmosférickém prostředí v obecném měřítku poměrně velmi dobře. Zinková vrstva brání přístupu kyslíku, vlhkosti a agresivním částicím z atmosféry k povrchu základního materiálu. Navíc v místě poškození povlaku je ocel chráněna katodickou ochranou [27].

Mezi faktory, které urychlují rychlost koroze patří zvýšený obsah částic síry v atmosféře. Podíl chloridů a oxidů dusíku má obecně nižší efekt na rychlost koroze, avšak jejich vliv se stává signifikantní při kombinaci právě se sulfáty. Negativní vliv má na závažnost korozního napadení rovněž vyšší vlhkost vzduchu. V prostředí s vyšším průmyslovým znečištěním – nejčastěji s vysokým obsahem oxidů síry ustupuje vliv vlhkosti na korozi do pozadí. Naopak tomu je v méně industriálních prostředích, kde hraje počet dní s vyšší vlhkostí větší roli. Vliv vybraných znečišťujících látek v atmosféře na rychlost koroze zinku ilustruje obr. 4.9 [27].



Obr. 4.9 Vliv znečišťujících látek přítomných v atmosféře na korozní rychlost zinku [15]



### Stanovení životnosti zinkových povlaků v atmosférickém prostředí

Pro klasifikaci korozní agresivity atmosféry, která je důležitá pro následnou predikci životnosti, se vychází z ročních korozních úbytků zinku (viz EN ISO 9223 – tab. 4.3).

**Tab. 4.3** Kategorie korozní agresivity v atmosférickém prostředí podle EN ISO 9223 [15]

Kategorie	Korozní účinek	Roční korozní úbytek zinku [μm/rok]
C1	velmi nízký	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$
C2	nízký	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$
C3	střední	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2$
C4	vysoký	$2 < r_{\text{corr}} \leq 4$
C5	velmi vysoký	$4 < r_{\text{corr}} \leq 8$
CX	extrémní	$8 < r_{\text{corr}} \leq 25$

Pro odhad ročních korozních úbytků zinku je možné podle revidované normy ISO 9223 použít rovnici [28]:

$$r_{\text{corr}} = 0,0129[\text{SO}_2]^{0,44} \cdot \exp(0,046RH + f_{\text{Zn}}) + 0,0175[\text{Cl}^-]^{0,57} \cdot \exp(0,008RH + 0,085T), \quad (2)$$

kde při  $T \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$

$$f_{\text{Zn}} = 0,038(T - 10) \quad (3)$$

a při  $T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$

$$f_{\text{Zn}} = -0,071(T - 10) \quad (4)$$

ostatní parametry v rovnicích jsou:

T průměrná roční teplota ve  $^\circ\text{C}$

[SO<sub>2</sub>] průměrná roční koncentrace SO<sub>2</sub> v μg.m<sup>3</sup>

RH průměrná relativní vlhkost

[Cl<sup>-</sup>] průměrná roční koncentrace Cl<sup>-</sup> ve srážkách v mg/l

Ačkoli se uvádí, že je tato výpočetní metoda přesnější, než postup odvození korozních rychlostí zinku na základě klasifikovaných intervalů základních environmentálních parametrů, z porovnání vypočtených a skutečných aktuálních ročních korozních úbytků zinku pro sledované lokality vyplývá, že vypočtené hodnoty jsou vyšší než skutečné hodnoty. Odchylka těchto vypočtených hodnot – ročních korozních úbytků zinku se může promítnout do predikce životnosti zinkových povlaků [28].

Při predikci dlouhodobých korozních úbytků zinku se jako podstatný jeví odhad životnosti zinkových povlaků do první údržby, přičemž životnost zinkového povlaku do první údržby je specifikována jako časový interval, který může uplynout od prvotního nanesení povlaku do takového stavu znehodnocení povlaku, kdy je nezbytná jeho oprava pro obnovení ochrany podkladového kovu. Tab. 4.4 zobrazuje odhad životnosti zinkových povlaků do první údržby v prostředích o různých stupních korozní agresivity [28].

**Tab. 4.4** Životnost do první údržby pro různé zinkové povlaky v prostředích o různé korozní agresivitě [28]

Způsob nanesení	Minimální tloušťka (μm)	Vybraný stupeň korozní agresivity, životnost min./max. (let) a kategorie ochrany s odhadem předpokládané životnosti (VL, L, M, H, VH) <sup>1</sup>							
		C3		C4		C5		CX	
Žárové zinkování ponorem	85	40/>100	VH	20/40	VH	10/20	H	3/10	M
	140	67/>100	VH	33/67	VH	17/33	VH	6/17	H
	200	95/>100	VH	48/95	VH	24/48	VH	8/24	H
Žárové zinkování plechy	20	10/29	H	5/10	M	2/5	L	1/2	VL
	42	20/60	VH	10/20	H	5/10	M	2/5	L
Elektrolytické nanášení plechy	5	2/7	LH	1/2	VL	1/1	VL	0/1	VL
	25	12/36	H	6/12	M	3/6	M	1/3	VL

Podle norem se doporučuje, že pokud je nezbytné prodloužit životnost protikorozní ochrany, musí být údržba provedena před počátkem rezavění oceli a nejlépe v době, kdy ještě zbývá 20 až 30 μm zinkového povlaku. Dobu do první údržby lze pak stanovit [28]:

$$t = \frac{h_p - 20}{r_{corr}}, \quad (5)$$

nebo

$$t = \frac{h_p - 30}{r_{corr}}, \quad (6)$$

kde:

t            doba expozice v rocích

h<sub>p</sub>          tloušťka zinkového povlaku zhotoveného žárovým ponorem v μm

r<sub>corr</sub>        roční korozní rychlost zinku v μm/rok

<sup>1</sup> VL – velmi krátká (<2 roky), L – krátká (2 až <5let), M – střední (5 <10 let), H – dlouhá (10 až <20 let), VH – velmi dlouhá (≥20 let)

Pro predikci dlouhodobých korozních úbytků konstrukčních kovů včetně zinku lze využít tzv. směrných hodnot úbytků zinku pro jednotlivé stupně korozní agresivity (tab. 4.5), které vychází z normy ČSN ISO 9224. Směrné korozní rychlosti v normě ISO 9224 byly konsenzuální hodnoty z řady dlouhodobých výzkumných programů realizovaných do roku 1990. Pro revidovanou normu ISO 9224 byl zvolený výpočetní model aplikován na aktuální databázi experimentálních výsledků [28].

**Tab. 4.5** Směrné hodnoty korozních rychlostí ( $r_{av}$ ,  $r_{lin}$ ) zinku v atmosférách s klasifikovanými stupni korozní agresivity ( $\mu\text{m/rok}$ ) [28]

Průměrná korozní rychlost ( $r_{av}$ ) během prvních 10 let expozice pro jednotlivé stupně korozní agresivity						
Kategorie korozní agresivity	C1	C2	C3	C4	C5	CX
ČSN ISO 9224	$r_{av} \leq 0,1$	$0,1 < r_{av} \leq 0,5$	$0,5 < r_{av} \leq 2,0$	$2,0 < r_{av} \leq 4,0$	$4,0 < r_{av} \leq 10$	-
revidovaná norma	$r_{av} \leq 0,07$	$0,07 < r_{av} \leq 0,5$	$0,5 < r_{av} \leq 1,4$	$1,4 < r_{av} \leq 2,7$	$2,7 < r_{av} \leq 5,5$	$5,5 < r_{av} \leq 16$
Ustálená korozní rychlost ( $r_{lin}$ ) v dalších letech pro jednotlivé stupně korozní agresivity						
Kategorie korozní agresivity	C1	C2	C3	C4	C5	CX
ČSN ISO 9224	$r_{lin} \leq 0,05$	$0,05 < r_{lin} \leq 0,5$	$0,5 < r_{lin} \leq 2,0$	$2,0 < r_{lin} \leq 4,0$	$4,0 < r_{lin} \leq 10$	-
Ustálená korozní rychlost ( $r_{lin}$ ) stanovená jako průměrná pro 30 let expozice pro jednotlivé stupně korozní agresivity						
Kategorie korozní agresivity	C1	C2	C3	C4	C5	CX
revidovaná norma	$r_{lin} \leq 0,05$	$0,05 < r_{lin} \leq 0,4$	$0,4 < r_{lin} \leq 1,1$	$1,1 < r_{lin} \leq 2,2$	$2,2 < r_{lin} \leq 4,4$	$4,4 < r_{lin} \leq 13$

### Korozní produkty

Tenká vrstva oxidu zinečnatého patří k prvním korozním produktům, které se tvoří při reakci zinku s atmosférickým kyslíkem. Tento korozní produkt se označuje jako zincit a má pouze omezený ochranný efekt. Zincit při kontaktu s vodou reaguje za vzniku hydroxidu, tvoří se tenký film  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ , který se následně při expozici transformuje v další korozní produkty.

Uhličitany vznikají jako výsledek reakce hydroxidu zinečnatého s atmosférickým oxidem uhličitým. Mezi nejčastěji se vyskytující a obecně přijímány patří  $\text{ZnCO}_3$  (smithsonite) a  $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$  (hydrozincit).

V atmosférách znečištěných oxidem siřičitým se tvoří sírany zinečnaté a hydroxysulfáty zinečnaté. Jedná se mimo jiné o sloučeniny s následujícím stechiometrickým složením

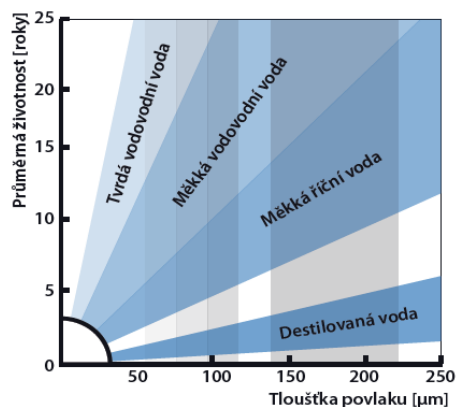
$6\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot \text{ZnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}_7(\text{OH})_{12} \cdot \text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{ZnSO}_4$ ,  $\text{Zn}_2(\text{OH})_2\text{SO}_4$ ,  $3\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot \text{ZnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , které přispívají k potlačení atmosférické koroze zinku. Na druhou stranu je třeba zmínit, že v atmosférách s tímto typem znečištění způsobují kyselé deště rozpouštění výše zmíněných korozních produktů, což rychlost koroze nezpomaluje [29].

#### 4.3.2 Koroze ve vodách

Na odolnost pozinkovaných povlaků proti korozi ve vodním prostředí působí mnoho aspektů – od pH vody, tvrdosti vody, teploty vody až po rychlost proudění. Přičemž platí, že pokud tyto jednotlivé faktory nebrání vytvoření ochranné vrstvy korozních produktů, zvyšuje se životnost zinkových povlaků.

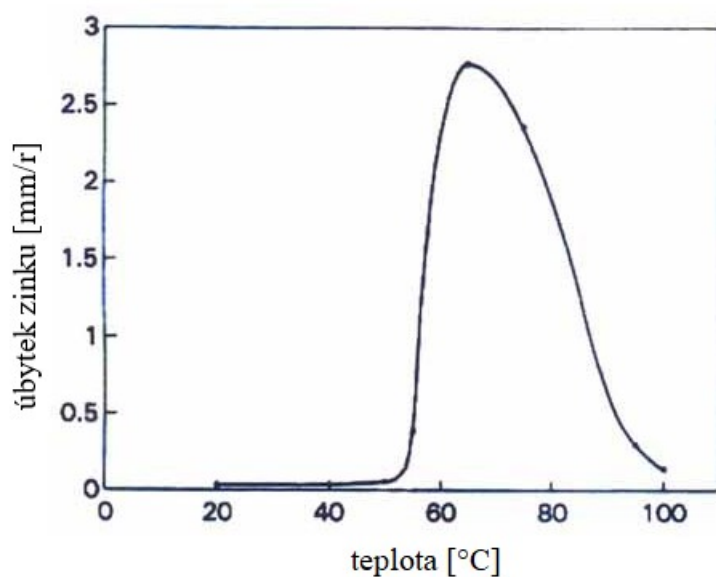
Zásadní význam má pH dané vody. V rozmezí pH mezi 5,5 až 12,5 a při teplotách 0 až 20 °C je rychlost koroze zinku běžně relativně nízká a stabilní [2].

Tvrdé vody obsahující vápník a hořčík jsou málo agresivní, neboť tvoří spolu s kyselinou uhličitou na povrchu zinku těžko rozpustné uhličitany, čímž je zajištěna stabilní ochranná vrstva. Naproti tomu měkké vody představují korozní ohrožení, neboť v nich soli chybějí a ochranná vrstva se nemůže tvořit. Střední dobu životnosti různě tlustých zinkových povlaků ilustruje obr. 4.10 [2].



**Obr. 4.10** Střední doba životnosti různě tlustých zinkových povlaků [2]

Teplota vody představuje důležitý faktor pro korozi – při překročení teploty cca 55 °C se mění vrstva ochranných korozních produktů na hrubozrnnou a ztrácí přilnavost k povrchu zinku, korozní produkty pak snadno odpadávají a odhalují nový, čistý povrch zinku pro další napadení. Maximum korozní rychlosti je při cca 70 °C a dále pak klesá (obr. 4.11) [2].



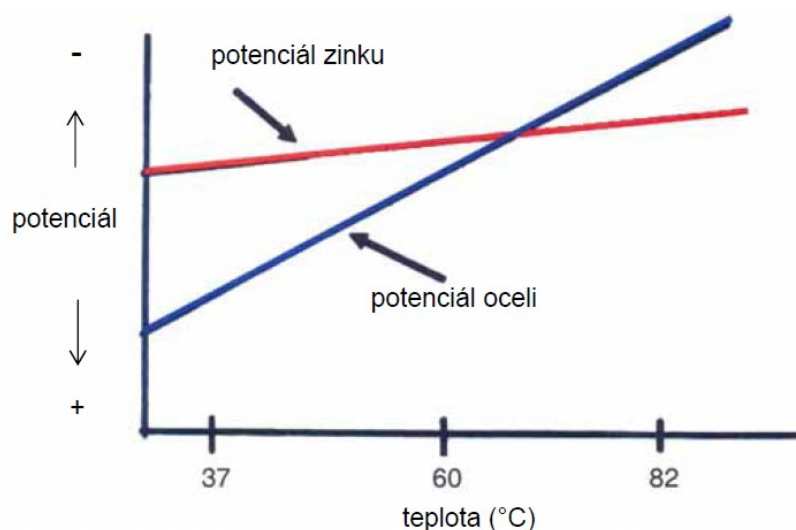
**Obr. 4.11** Rychlost koroze zinku v provzdušněné destilované vodě v závislosti na teplotě [22]

Tab. 4.6 zachycuje vliv teploty na korozi zinku v destilované vodě.

**Tab. 4.6** Vliv teploty na korozi zinku v destilované vodě [19]

t [°C]	Poměrná rychlost koroze	Vzhled korozních produktů
20	1	plně gelovité
50	3,51	méně gelovité, adhezní
55	19,53	převážně krystalické
65	147,94	křehké, neadhézní
75	117,94	zrnité až šupinaté
95	15,05	kompaktní, pevné
100	6,02	velmi pevné

Specifické vlastnosti vykazuje zinkový povlak již v teplé vodě blízké 60°C. Vlivem změny polarity zinkového povlaku (obr. 4.12) vůči chráněné oceli dochází k intenzivnímu koroznímu napadení oceli (voda znečištěna korozními produkty) a začíná intenzivní bodová koroze oceli podporovaná navíc nedostatkem kyslíku pod korozními úsadami [2, 22, 30].



**Obr. 4.12** Změna korozního potenciálu zinku a oceli v závislosti na teplotě vody [22]

Proudící voda rychlostí vyšší než 0,5 m/s brání vzniku ochranné vrstvy na povrchu zinku a koroze je rychlejší. Ochranné vrstvy, které zpomalují či brání korozi zinku, jsou málo rozpustné uhličitany. Jejich tvorba obecně závisí na obsahu látek ve vodním prostředí, které napomáhají jejich vzniku i obnově (oxid uhličitý, vápník, hořčík) [2, 22].

#### 4.3.3 Koroze v půdě

Pro posouzení pravděpodobnosti koroze kovových konstrukcí v půdním prostředí se zohledňují parametry půdy (pH, obsah vody, obsah solí, složení, homogenita, měrný odpor), charakteristiky nechráněné konstrukce (geometrie, materiál, provozní podmínky) a další činitele prostředí. Zvýšení korozního napadení lze očekávat v kyselých půdách a půdách s vyššími obsahy rozpustných látek. V půdách alkalických a oxidujících jsou zinkové povlaky velmi rezistentní. Uvádí se, že u běžného povlaku o tloušťce 85 μm se dosahuje životnosti průměrně přes 10 let. Obecně platí, že nejagresivnější jsou půdy silně redukčního charakteru, ve kterých bývá rychlost koroze zinku cca 15 μm za rok. Jednotlivé půdní druhy lze rozdělit podle korozní agresivity tab. 4.7. Podle této agresivity a dalších faktorů jako je stav půdy či její odpor lze navrhnout vhodný způsob protikorozní ochrany [2, 19].

**Tab. 4.7** Korozní agresivita různých typů půd [2]

Druh půdy	Agresivita
vápencová, vápencový slín, morénová, pískovcový slín	malá
písečná, štěrkovitá	střední
jílovitá, rašelinná, slatinná, bohatá na humus	velká

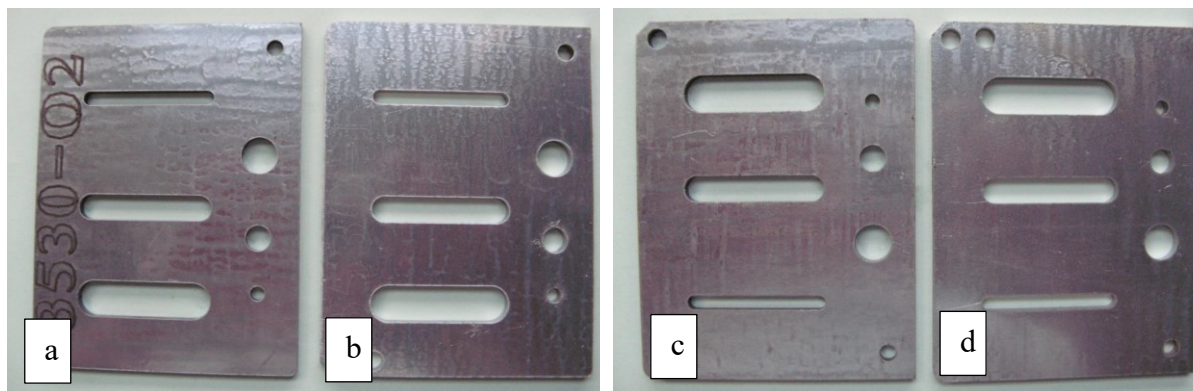
## 5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části této diplomové práce bylo cílem zjištění korozního napadení a korozní odolnosti pozinkovaného ocelového plechu v oblasti řezu laserem, přičemž byly porovnávány vzorky, které byly řezány laserem za pomoci kyslíku nebo dusíku jako aktivního plynu. Pro získání informací o korozních vlastnostech povlaků byly provedeny následující zkoušky a sledování povrchu vzorků:

- Měření tloušťky zinkových protikorozních povlaků na dílcích z plechu
- Elektrochemické zkoušky na vzorcích v roztocích NaCl a Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- Expozice vzorků v komoře solné a komoře klimatické
- Metalografické výbrusy vzorků a hodnocení struktury pozinkovaného plechu

### 5.1 Vzorky pro experimentální měření

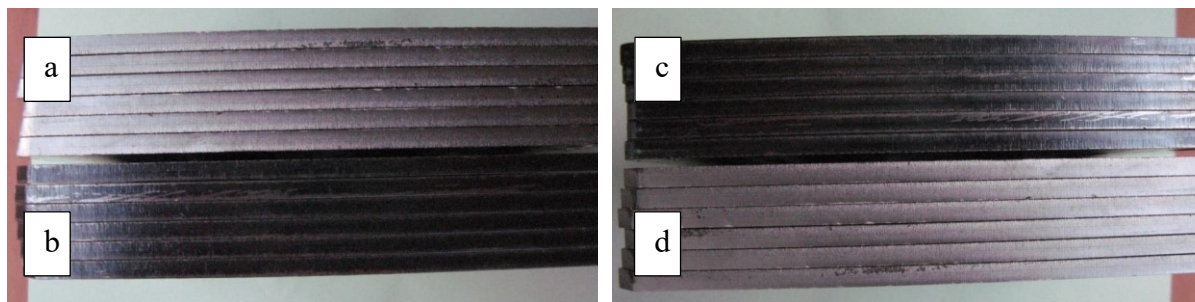
Pro účely provedení experimentů byly použity dodané pozinkované plechy z oceli (obr. 5.1) s otvory vyřezanými laserem v atmosféře kyslíku a dusíku, přičemž po obvodu byly vzorky také odřezané laserem. Dodané vzorky měly rozměry 130 x 100 mm a tloušťky 4 mm.



**Obr. 5.1** Dodané vzorky pozinkovaného plechu: a,c – vzorek řezaný v atmosféře s kyslíkem (přední a zadní strana); b,d – vzorek řezaný v atmosféře s dusíkem (přední a zadní strana)

Na obr. 5.2 byl zachycen pohled na obvodové delší řezné plochy dodaných vzorků před korozními testy. Na vzorcích řezaných v atmosféře s kyslíkem byla pozorovatelná tmavě modrá lesklá vrstva oxidů, přičemž v některých místech byla vrstva oxidů narušena.





**Obr. 5.2** Pohled na obvodové delší řezné plochy: a,d – vzorek řezaný v dusíku (přední a zadní strana); b,c – vzorek řezaných v kyslíku (přední a zadní strana)

Pro účely provedení experimentů byly vzorky odřezané v dusíku označeny symboly N1, N2 až N6, vzorky odřezané v kyslíku O1, O2 až O6. Další písmena (a, b, k apod.) byla použita pro rozlišení jednotlivých testů na vzorcích.

## 5.2 Hodnocení a měření nanesených zinkových povlaků na vzorcích

### Měření tloušťky elektromagnetickou metodou

Jedná se o způsob měření, který představuje nedestruktivní postup stanovení tloušťek ochranných systémů. Pro stanovení celkové tloušťky zinkového povlaku byl použit kalibrovaný Elcometer 456 F1 – digitální příruční tloušťkoměr (obr. 5.3) pro měření tloušťky neferomagnetických povlaků a vrstev na feromagnetickém základním materiálu (měřicí rozsah od 1  $\mu\text{m}$  do 1 mm). Výrobce uvádí přesnost měření  $\pm 1 \%$ , přičemž přístroj je používán v souladu s mezinárodními normami.

Na dodaných vzorcích (před korozními zkouškami) byly změřeny tloušťky ochranných povlaků pomocí zařízení Elcometer 456 F1. Na každém jednom vzorku bylo provedeno měření 10krát a poté se vypočítaly vybrané statistické ukazatele. Získané hodnoty byly zaznamenány do tabulek viz níže.



**Obr. 5.3** Digitální příruční tloušťkoměr Elcometer 456 F1

Výsledky měření tloušťky elektromagnetickou metodou pro vzorky (před korozní expozicí) řezané v atmosféře s kyslíkem (vzorky č.03a, 03b, 04a a 04b) v tab. 5.1-5.4

**Tab. 5.1** Pro vzorek č.03a

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
1	13,7
2	13,7
3	18,5
4	20,1
5	8,8
6	18,2
7	14,3
8	16,3
9	6,5
10	19,1

**Tab. 5.2** Pro vzorek č.03b

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
1	9,7
2	12,0
3	23,8
4	25,9
5	33,2
6	23,4
7	25,6
8	10,7
9	17,9
10	20,0

**Tab. 5.3** Pro vzorek č.04a a 04b

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
1	17,5
2	10,0
3	14,1
4	16,9
5	10,6
6	25,4
7	22,4
8	14,5
9	8,9
10	15,7

**Tab. 5.4** Souhrnné výsledky pro vzorky řezané v atmosféře s kyslíkem (před korozní expozicí)

Počet měření	30
<b>Průměrná tloušťka [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>16,9</b>
Směrodatná odchylka	6,1
Nejvyšší naměřená tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	33,2
Nejnižší naměřená tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	6,5
<b>Gramáž naneseného zinku [<math>\text{g}/\text{m}^2</math>]</b>	<b>120,7</b>

Výsledky měření tloušťky elektromagnetickou metodou pro vzorky (před korozní expozicí) řezané v atmosféře s dusíkem (vzorky č. N4a, N4b a N3b) v tab. 5.5-5.8

**Tab. 5.5** Pro vzorek č. N4a

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
1	21,7
2	24,9
3	10,9
4	23,7
5	23,9
6	12,9
7	19,5
8	8,1
9	8,3
10	22,6

**Tab. 5.6** Pro vzorek č. N3b

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
1	26,9
2	19,9
3	19,7
4	20,7
5	22,0
6	15,9
7	17,5
8	14,5
9	14,5
10	12,7

**Tab. 5.7** Pro vzorek č. N4a a N4b

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
1	27,0
2	21,2
3	21,9
4	15,8
5	21,9
6	16,1
7	16,8
8	15,0
9	22,5
10	21,5

**Tab. 5.8** Souhrnné výsledky pro vzorky řezané v atmosféře s dusíkem (před korozní expozicí)

Počet měření	30
<b>Průměrná tloušťka [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>18,7</b>
Směrodatná odchylka	5,0
Nejvyšší naměřená tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	27,0
Nejnižší naměřená tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	8,1
<b>Gramáž naneseného zinku [<math>\text{g}/\text{m}^2</math>]</b>	<b>128,5</b>

### *Měření tloušťky pomocí metalografického mikroskopu*

Pro měření nanesených zinkových povlaků před a po korozní expozici byly použity vzorky, které byly laserově řezány jak v prostředí kyslíku, tak v prostředí dusíku, jakožto aktivního plynu. Vzorky byly zdokumentovány pomocí světelného mikroskopu OLYMPUS GX 51. Povlaky byly měřeny v programu Quick PHOTOPRO v laboratoři KMI 636 VŠB-TU Ostrava. Naměřené hodnoty tlouštěk povlaků byly patřičně zaznamenány na fotografických snímcích a zpracovány do tabulek.

Výsledky metalografického šetření – naměřené tloušťky pozinkované vrstvy (podélný řez otvorem) pro vzorky, které byly laserově řezány v atmosféře s dusíkem, jak před, tak po korozní expozici (60 hod. v komoře solné mlhy) jsou zaznamenány v tab. 5.9 a 5.10. Souhrnné výsledky se nachází v tab. 5.11 a 5.12.

**Tab. 5.9** Vzorky řezané v atmosféře s dusíkem před korozní expozicí

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [μm]
1	31,3
2	24,2
3	27,5
4	31,8
5	36,0
6	34,5
7	34,2
8	31,8
9	34,0
10	26,7
11	18,7
12	21,5
13	32,4
14	27,5
15	24,5
16	36,7
17	32,7
18	33,3

**Tab. 5.11** Souhrnné výsledky pro vzorky řezané v atmosféře s dusíkem před korozní expozicí

Počet měření	18
<b>Průměrná tloušťka [μm]</b>	<b>30,0</b>
Směrodatná odchylka [μm]	4,3
<b>Gramáž naneseného zinku [g/m<sup>2</sup>]</b>	<b>214,2</b>

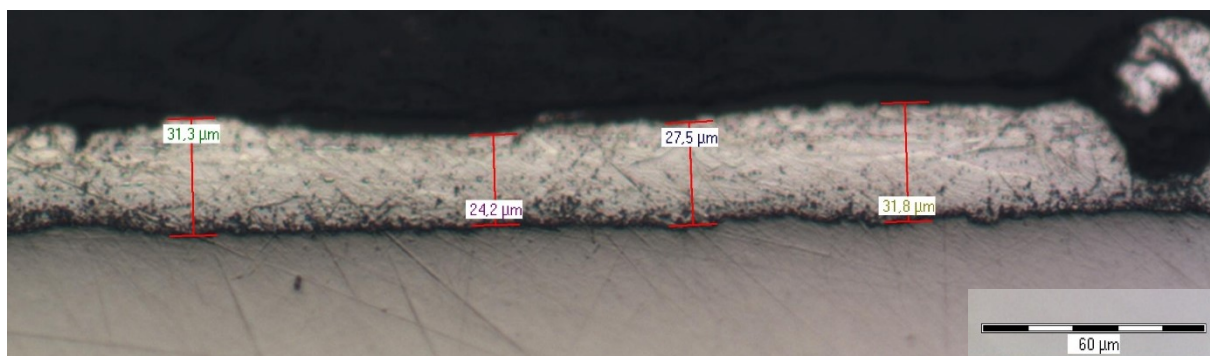
**Tab. 5.10** Vzorky řezané v atmosféře s dusíkem po korozní expozici

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [μm]
1	17,1
2	14,7
3	10,0
4	17,1
5	11,4
6	9,2
7	25,6
8	25,9
9	11,7
10	18,7
11	8,9
12	21,0
13	26,2
14	23,9
15	26,6

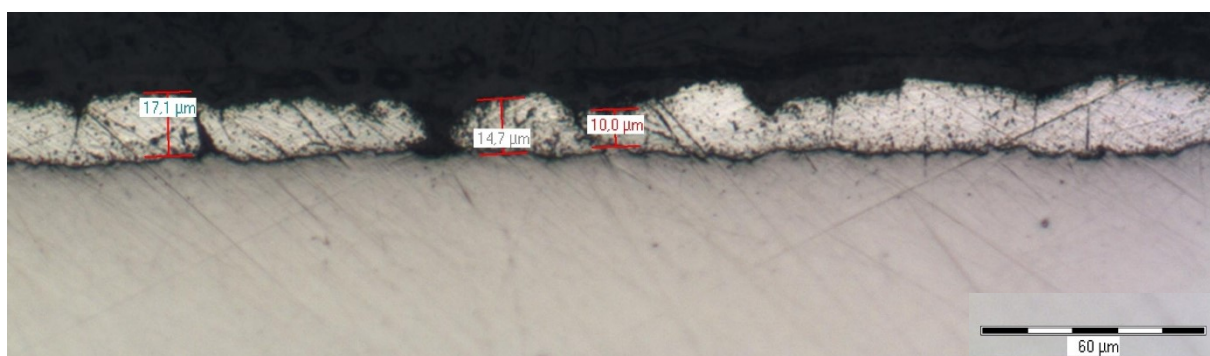
**Tab. 5.12** Souhrnné výsledky pro vzorky řezané v atmosféře s dusíkem po korozní expozici

Počet měření	15
<b>Průměrná tloušťka [μm]</b>	<b>17,9</b>
Směrodatná odchylka [μm]	5,7
<b>Gramáž zbylého zinku [g/m<sup>2</sup>]</b>	<b>127,8</b>

Na obr. 5.4 a obr. 5.5 jsou zachyceny ilustrační metalografické snímky pozinkovaného plechu (podélný řez otvorem), na jejichž základě byla stanovena tloušťka zinkové vrstvy – pro vzorky řezané v atmosféře s dusíkem, a to jak před, tak po korozní expozici.



**Obr. 5.4** Metalografický snímek pozinkovaného plechu řezaného v atmosféře s dusíkem pro zjištění tloušťky zinkové vrstvy před korozní expozicí (podélný řez otvorem)



**Obr. 5.5** Metalografický snímek pozinkovaného plechu řezaného v atmosféře s dusíkem pro zjištění tloušťky zinkové vrstvy po korozní expozici 60 hod. (podélný řez otvorem)

Výsledky metalografického šetření – naměřené tloušťky pozinkované vrstvy (podélný řez otvorem) pro vzorky, které byly laserově řezány v atmosféře s kyslíkem, jak před, tak po korozní expozici (60 hod. v komoře solné mlhy) jsou zaznamenány v tab. 5.13 a 5.14. Souhrnné výsledky se nachází v tab. 5.15 a 5.16.

**Tab. 5.13** Vzorky řezané v atmosféře s kyslíkem před korozní expozicí

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
1	14,4
2	14,4
3	20,4
4	13,8
5	21,3
6	19,0
7	20,9
8	19,0
9	15,2
10	23,2
11	21,0
12	20,7
13	13,4
14	19,3
15	22

**Tab. 5.14** Vzorky řezané v atmosféře s kyslíkem po korozní expozici

Číslo měření	Tloušťka vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]
1	14,5
2	17,7
3	7,9
4	6,5
5	14,1
6	14,1
7	17,4
8	10,9
9	8,9
10	17,4
11	14,4
12	11,5
13	23,6
14	20,2
15	8,5

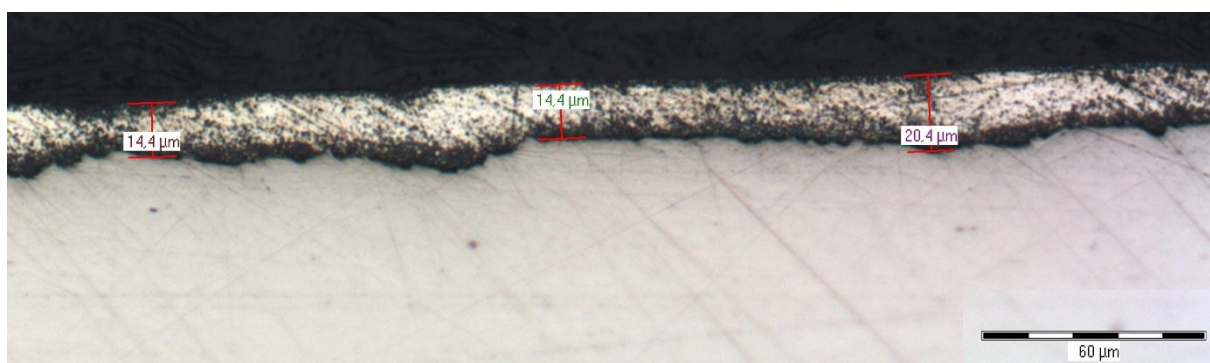
**Tab. 5.15** Souhrnné výsledky pro vzorky řezané v atmosféře s kyslíkem před korozní expozicí

Počet měření	15
Průměrná tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	<b>18,5</b>
Směrodatná odchylka [ $\mu\text{m}$ ]	2,9
Gramáž naneseného zinku [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	<b>132,1</b>

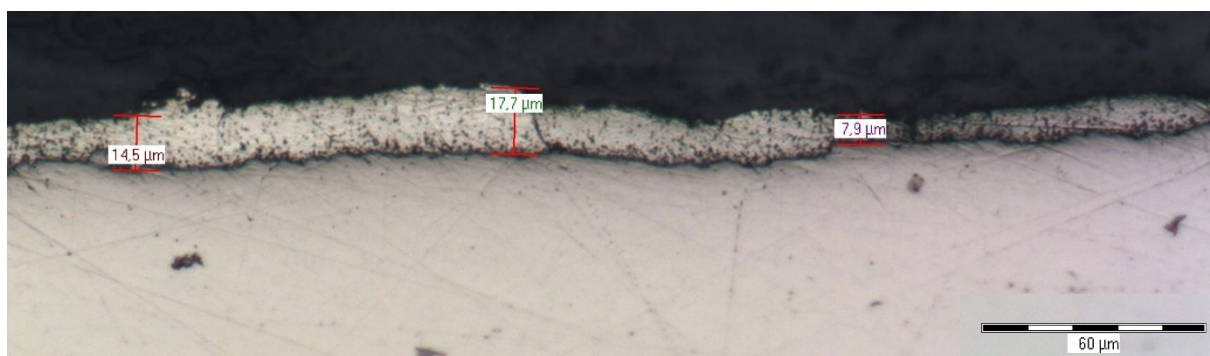
**Tab. 5.16** Souhrnné výsledky pro vzorky řezané v atmosféře s kyslíkem po korozní expozici

Počet měření	15
Průměrná tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	<b>13,8</b>
Směrodatná odchylka [ $\mu\text{m}$ ]	3,8
Gramáž zbylého zinku [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	<b>98,5</b>

Na obr. 5.6 a obr. 5.7 jsou zachyceny ilustrační metalografické snímky pozinkovaného plechu (podélný řez otvorem), na jejichž základě byla stanovena tloušťka zinkové vrstvy – pro vzorky řezané v atmosféře s kyslíkem, a to jak před, tak po korozní expozici.



**Obr. 5.6** Metalografický snímek pozinkovaného plechu řezaného v atmosféře s kyslíkem pro zjištění tloušťky zinkové vrstvy před korozní expozicí (podélný řez otvorem)



**Obr. 5.7** Metalografický snímek pozinkovaného plechu řezaného v atmosféře s kyslíkem pro zjištění tloušťky zinkové vrstvy po korozní expozici (podélný řez otvorem)

### 5.3 Elektrochemické zkoušky ve vybraných roztocích

Elektrochemické metody využívají závislosti mezi korozním potenciálem a proudem, který prochází přes kovový povrch, a jejich změny v čase. Jako měřítko oxidačních podmínek na kovovém povrchu v elektrolytu se považuje samovolný korozní potenciál. Korozní potenciál je měřitelná hodnota napětí proti referenční (srovnávací) elektrodě. Potenciál kovu se při průchodu proudu mění a z této závislosti je možné určit korozní rychlost, pasivovatelnost kovů nebo hraniční potenciálové podmínky použití. V laboratorních podmínkách jsou nejčastěji snímány tzv. potenciodynamické křivky, při kterých se zaznamenává proudová odezva na plynulou změnu potenciálu. K tomuto účelu slouží tříelektrodové zapojení s korozní celou. Potenciostat je přístroj, kterým je možno sledovat korozi kovů elektrochemickými metodami.

#### *Podmínky elektrochemických zkoušek*

Pro polarizační měření byly vybrány dodané vzorky N3 a O3, napůl s využitím podélného otvoru (u vzorků N3a, N3b, O3a a O3b). Pomocí elektrochemických testů dle ČSN EN ISO 17475 byly naměřeny a porovnány hodnoty korozního potenciálu, polarizačního odporu a stanoveny střední rychlosti koroze ve dvou prostředích, navíc byly stanoveny hodnoty potenciálu bodové koroze (repasivace, depasivace) konvenčním způsobem. Při potenciodynamické polarizační metodě byly použité vodné roztoky NaCl (0,1 mol/l) a roztok Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,5 mol/l). Roztoky s chloridovými ionty (Cl<sup>-</sup>) se používají při simulaci např. přímořské atmosféry nebo prostředí, ve kterém se nachází roztoky posypových solí apod. Roztoky se síranovými ionty (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) obvykle simulují prostředí v průmyslových aglomeracích.

#### *Podmínky a parametry elektrochemické koroze:*

Hodnoty potenciálů jsou měřeny vzhledem k nasycené kalomelové elektrodě (SCE). Rychlost polarizace byla nastavena na 1mV/s ve všech dílčích testech, teplota roztoku a vzorku 23°C. Počáteční potenciál ( $E_{cor}$ ) při potenciodynamické metodě byl zvolen -50mV.

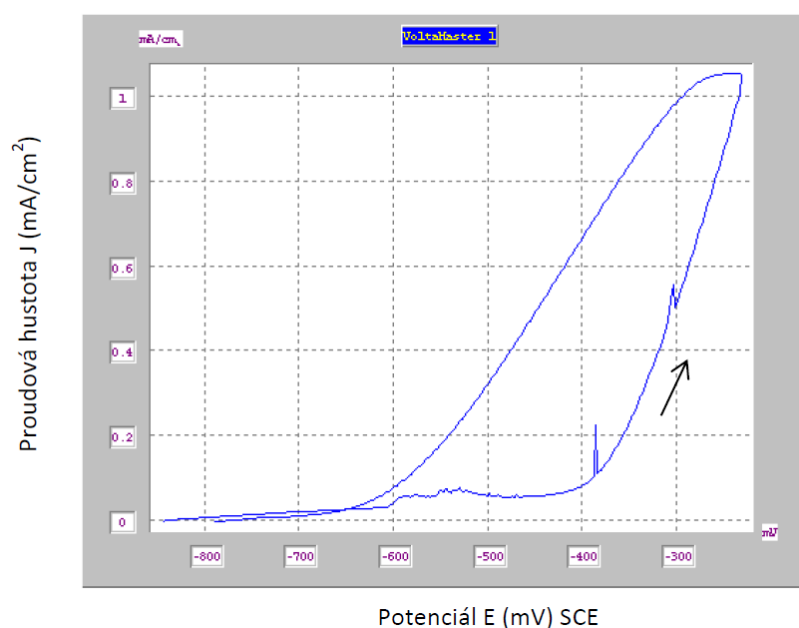
#### *Výsledky měření*

Nižší odolnost oceli proti korozi na ploše řezu zhotoveného laserem v prostředí dusíku dokládají nižší naměřené hodnoty  $E_{cor}$ ,  $R_p$ ,  $E_d$  a  $E_r$  a zároveň vyšší hodnoty rychlosti koroze ( $r_c$ ) viz tab. 5.17. S ohledem na měření na příčném řezu s nerovnostmi a s malou exponovanou plochou (nominální plocha 15 mm<sup>2</sup>) mohou být některé naměřené hodnoty méně přesné.



Ze srovnání odolnosti proti korozi na řezech vytvořených v kyslíku a dusíku vyplývá, že vyšší odolností disponují řezy vytvořené v atmosféře kyslíku. Rozdíly v korozní odolnosti jsou poměrně malé podle naměřených parametrů (v desítkách % nebo malých násobcích, nikoli v dekadických řádech). Pro účely srovnání byly polarizační testy provedeny rovněž na povrchu řezu oceli po přebroušení povrchu jemnými brusnými papíry (SiC, č. 400-1200).

Na obr. 5.8 je zobrazena závislost proudové hustoty na potenciálu pro vzorek, který byl řezán v atmosféře s dusíkem. Test byl proveden v roztoku 0,1 M NaCl při 23°C. V grafu je zjevná přítomnost tzv. polarizační smyčky, která je charakteristická pro bodovou korozi.

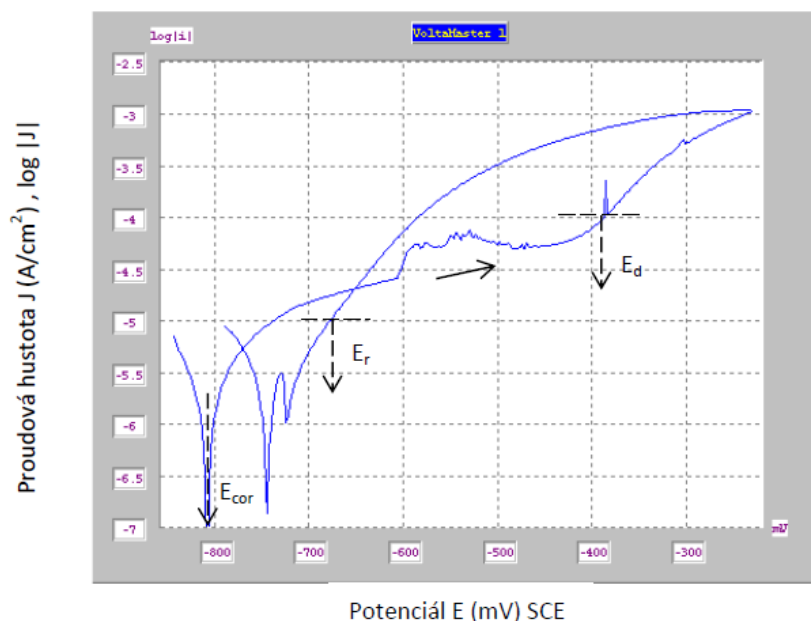


**Obr. 5.8** Polarizační křivka na povrchu řezu laserem pro vzorek N3b3

**Tab. 5.17** Výsledky elektrochemického zkoušení korozních vlastností vzorků na řezech zhotovených laserem v prostředí dusíku (N) nebo kyslíku (O)

Vzorek	$E_{cor}$	$R_p$	$R_{pk}$	$r_c$	S	$E_d$	$E_r$	Prostředí	Poznámky
Pořadí	mV	$k\Omega \cdot cm^2$	$k\Omega \cdot cm^2$	mm/rok	cm <sup>2</sup>	mV	mV	roztok	
N3b1	-867	2,85						0,1 M NaCl	Otvor Ø 9
N3b2	-801	6,10						0,1 M NaCl	Laser + N <sub>2</sub>
N3b3	-833	6,04	6,63	0,024	1,13	-380	-670	0,1 M NaCl	Vliv Fe + Zn
N3b1-3	-834	5,00							průměr
O3b1	-755	5,90	4,39	0,018	1,13	-320	-700	0,1 M NaCl	Otvor Ø 9
O3b2	-852							0,1 M NaCl	Laser + O <sub>2</sub>
O3b3	-835							0,1 M NaCl	Vliv Fe + Zn
O3b1-3	-814								průměr
N3b4	-639	1,25						0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Řez vně
N3b5	-654	1,61						0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Laser + N <sub>2</sub>
N3b6	-698	2,29	1,45	0,119	0,15	-658	-710	0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
N3b4-6	-663	1,72							průměr
O3b4	-568	2,45						0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Řez vně
O3b5	-565	2,80						0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Laser + O <sub>2</sub>
O3b6	-561	3,00	1,96	0,082	0,15	-440	-600	0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
O3b4-6	-565	2,75							průměr
O3a2	-412	22,0	21,5	0,007	0,15	-263	-462	0,1 M NaCl	Řez vně, Laser + O <sub>2</sub>
O3a3	-404	12,8	12,1	0,012	0,15	-252	-454	0,1 M NaCl	
N3b7	-665	30,1	20	0,037	0,15	-304	-657	0,1 M NaCl	Řez vně, Laser + O <sub>2</sub>
N3a1	-623	1,91	2,03	0,080	0,15	-442	-650	0,1 M NaCl	
O3bZn1	-1002	31,4	17,5	0,005	0,5	-952	-1065	0,1 M NaCl	Plocha Zn dodaná
O3bZn2	-1056	12,0	2,9	0,031	0,5	-978	-1065	0,1 M NaCl	
N3bZn1	-1108	6,62	1,94	0,053	0,5	-1045	-1106	0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Povlak Zn stejně místo
N3bZn2	-1056	3,74	0,581	0,120	0,5	-1072	-1108	0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
N3bFe1	-641	1,1	0,907	0,174	0,15	-612	-671	0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Řez + výbrus ocel, SiC 400
N3bFe2	-688	1,84	1,55	0,113	0,15	-630	-683	0,5M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
O3mFe1	-423	4,32	0,650	0,155	0,5	-290	-473	0,1 M NaCl	metalograf. výbrus, ocel
O3mFe2	-568	2,15	0,530	0,135	0,5	-480	-550	0,1 M NaCl	

Na obr. 5.9 je zachycena závislost proudové hustoty na potenciálu v semilogaritmické stupnici pro vzorek řezaný v dusíkové atmosféře. V grafu je vyznačen korozní potenciál ( $E_{cor}$ ), konvenční hodnoty potenciálu depasivace ( $E_d$ , pro  $J = 10^{-5} \text{ A/cm}^2 = 100 \mu\text{A/cm}^2$ ) a potenciálu repasivace ( $E_r$ , pro  $J = 10^{-5} \text{ A/cm}^2 = 100 \mu\text{A/cm}^2$ ) bodové koroze. V grafu se nachází polarizační smyčka typická pro bodovou korozi.



**Obr. 5.9** Polarizační křivka na povrchu řezu laserem pro vzorek N3b3 (semilogaritmická stupnice)

#### 5.4 Expozice vzorků v komoře solné (KS) a komoře klimatické (KK)

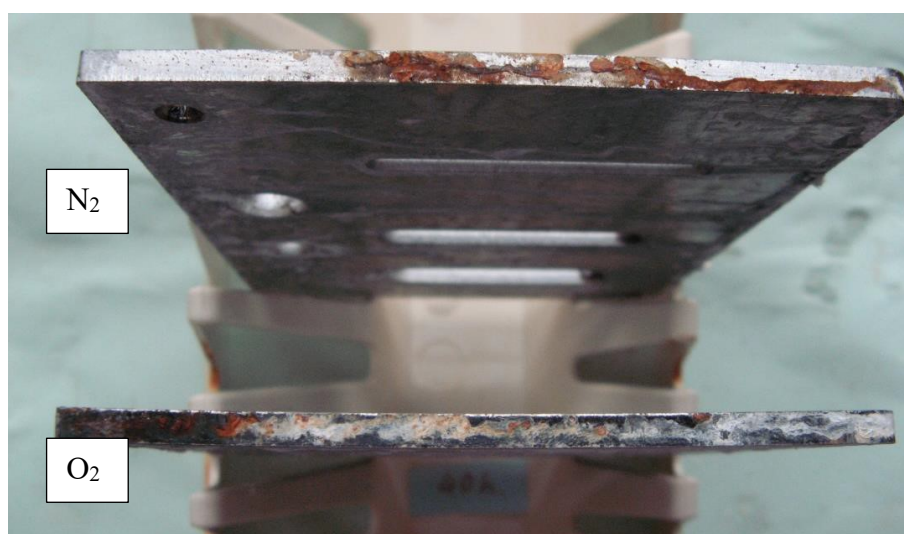
##### Test v neutrální solné mlze

Test v solné mlze byl proveden dle normy ČSN EN ISO 9227 po celkovou dobu 720 hodin, a to na obou typech vzorků. Jeden byl odřezán laserem s kyslíkem (značení O) a druhý s dusíkem (N). Na každém vzorku byly sledovány všechny vnější plochy řezu laserem a také všechny vnitřní otvory (3 větší podélné a kruhové) s ohledem na rozsah a formu koroze. Pozorování proběhlo po dobách expozice (hod.): 40, 164, 420, 480 a 720. Na základě fotodokumentace byly sestaveny grafické závislosti podílu rzi na řezech na době expozice – vyhodnoceny a porovnávány byly vnější plochy řezů.

Obecně platí, že urychlené zkoušky solnou mlhou a jejich kombinované varianty se používají při simulaci působení přímořského podnebí, nebo dezinfekčních preparátů s obsahem chlornanů, anebo vlivu posypových solí ze silnic zejména u dopravních prostředků. Uvedenou zkoušku lze tedy použít i pro porovnání korozní odolnosti řezů zhotovených laserem pro dílce eskalátorů.

### *Po více než 40 hodinách expozice*

Po expozici 40 a 60 hodin bylo možné pozorovat v průměru odolnější řezy s oxidovou vrstvou, na řezech v dusíku byly patrné větší rezavé skvrny a body (obr. 5.10, obr. 5.11 a obr. 5.12). Je možné konstatovat, že se zde účinek zinkového povlaku na snížení koroze na řezech provedených laserem s kyslíkem nebo dusíkem neprojevil. Rezavé skvrny, které byly přítomné na řezech vytvořených laserem v kyslíku, vznikaly přednostně v místech defektní nebo odpadlé vrstvy oxidů. Pro plochy řezů vypálených v kyslíku i dusíku při tavném řezání laserem bylo patrné různé pokrytí světle šedými korozními produkty zinku, které ztékaly z oblasti zinkového povlaku.



**Obr. 5.10** Pohled na boční plochy po 40 hodinové expozici v KS – více rzi na vzorku řezaném v dusíku (nahore). Výskyt rzi oceli je nerovnoměrný.



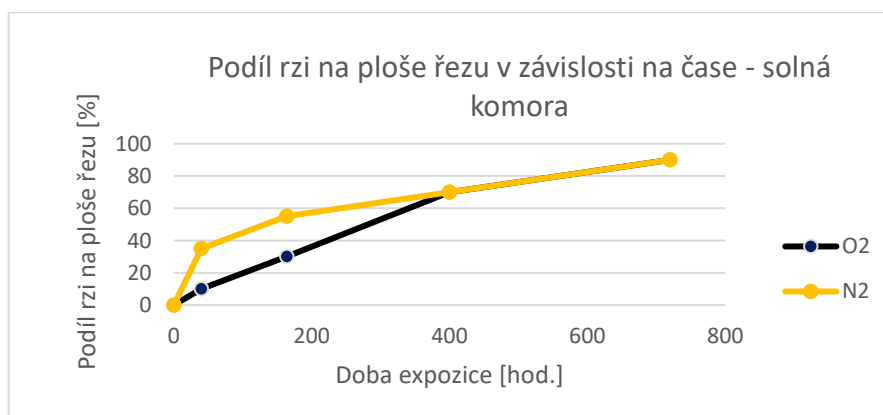
**Obr. 5.11** Pohled na spodní plochy vzorků po expozici 40 hod. v KS – rezavé skvrny a body se vyskytují na plochách vnitřních otvorů vyřezaných laserem v dusíku.



**Obr. 5.12** Pohled na vzorky z boční strany po 40 hodinové expozici v KS – nahoře vzorek odřezaný v kyslíku, kde je na podélných otvorech v drsnější části řezu několik menších rezavých teček; dole vzorek odřezaný v dusíku s rezavými skvrnami

#### Po expozici 720 hodin

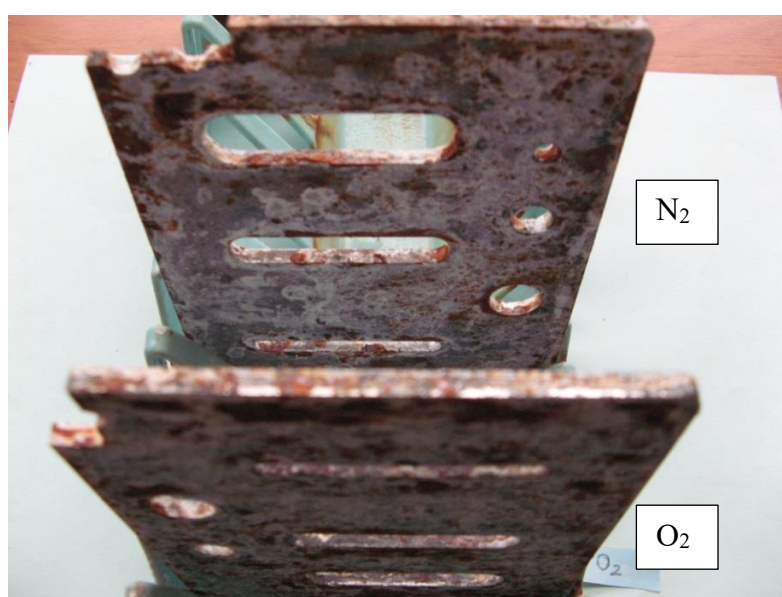
K vyrovnání rozdílu korozního napadení řezů zhotovených laserem v kyslíku nebo dusíku došlo po delší době expozice v solné mlze (nad 160 hodin) a na konci 720 hodinové expozice (obr. 5.13). Na obou řezech se poté (obr. 5.14 a 5.15) vyskytovalo přes 90 % rezavých oblastí a skvrn. Na plochách, které byly původně chráněny povlakem zinku, vzniklo 20-30 % ploch rezavých skvrn, přednostně v místech s tenčím zinkovým povlakem. Lze konstatovat, že se vliv povlaku zinku na zpomalení koroze na povrchu řezu po delší expozici ve značně agresivním prostředí komory solné neprojevil. Příčinou, proč došlo k vyrovnání rozsahu koroze na ploše řezu zhotovené laserem s kyslíkem je souvislost s defektností, slabou přilnavostí a křehkostí oxidových vrstev, které při intenzivní korozi odpadávají.



**Obr. 5.13** Podíl rzi na ploše řezů v závislosti na čase během expozice v komoře solné



**Obr. 5.14** Porovnání rozsahu korozního napadení po celkové době expozice 720 hod. v KS – přibližně stejný rozsah napadení na řezech laserem v dusíku i kyslíku



**Obr. 5.15** Porovnání nerovnoměrné koroze po expozici 720 hod. v KS

### *Zkouška odolnosti vlhkosti v klimatické komoře*

Podle normy ČSN EN ISO 6270 proběhla expozice vybraných vzorků (značení N2, N4, O2 a O4) v klimatické komoře po celkovou dobu 480 hodin při vlhkosti kolem 95 % a teplotě 35 °C za účelem zrychlení procesu koroze při zachování hlavního řídicího mechanismu. Vzorky byly prohlíženy po expozici 7, 38, 86, 330, 420 a 480 hodin. Po vybraných dobách testu byly též fotografovány a pak byly sestrojeny závislosti rzi na době expozice v KK.

Z výsledků vyplývá, že k většímu rozsahu koroze došlo při testu na vzorcích řezaných s dusíkem ve formě rezavých bodů a skvrn. Velikost a počet rezavých skvrn se při nerovnoměrné korozi zvyšoval s dobou expozice, přičemž po delší době expozice korozní produkty pokrývaly takřka souvislou oblast ve střední části vzorku. Na okraji řezů bylo korozní napadení oceli sníženo vlivem působení galvanického protektivního účinku od povlaku zinku.



Ochranný účinek se na řezech v dusíku projevil do vzdálenosti cca 0,5mm. Ve střední části řezů byla větší intenzita a rozsah koroze, tj. slabší nebo žádný dosah galvanického katodického účinku zinku. Na druhou stranu na řezech zhotovených v kyslíku se ochranný účinek povlaku zinku neprojevil na řezu, zde docházelo k tvorbě rezavých bodů a skvrn v místech poškození a odpadnutí vrstvy oxidu u hran.

Tzv. bílá rez na zinku byla pozorována na hranách u řezů, kde koroze zinku byla urychlována ocelí na řezu při působení korozního článku. Účinnost a dosah zinkového povlaku na korozi oceli v řezu závisí mj. na dodatečné ochraně zinku, např. chromátováním a na vlastnostech produktů koroze (defektnost, rozpustnost, přilnavost) na povrchu zinku. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, ochranné vlastnosti mají nerozpustné uhličitany (např. uhličitán zinečnatý), naopak bez ochranné schopnosti je chlorid zinečnatý.

Ze zkoušky odolnosti vlhkosti v klimatické komoře vyplývá, že na řezech v kyslíku probíhala koroze celkově pomaleji a v menším rozsahu než na vzorcích řezaných v dusíku. Mírný ochranný účinek zinku se projevil v místech odloupnuté nebo nepřilnavé vrstvy oxidu.

#### *Po expozici 7 hodin*

Po expozici 7 hodin v KK (při 35 °C a cca 95 % r.v.) bylo možné pozorovat při pohledu na horní stranu vzorků (obr. 5.16), že na vzorcích řezaných v dusíku (nahore) se vyskytovaly rezavé skvrny, zatímco vzorek řezaný v kyslíku byl bez koroze, přičemž tmavé tečny u hran představovaly nerovnosti na ploše řezu. Pohled na dolní a boční stranu vzorků přináší obr. 5.17 a 5.18.



**Obr. 5.16** Pohled na horní stranu vzorků po 7 hodinové expozici při krátkodobém vytažení z KK pro prohlížení a fotografování.



**Obr. 5.17** Pohled na dolní stranu vzorků po expozici 7 hod. v KK

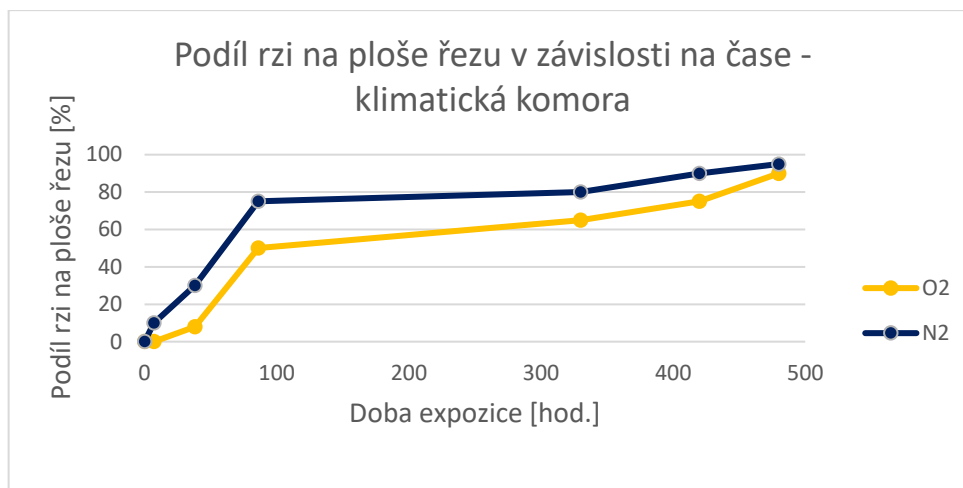


**Obr. 5.18** Pohled na boční plochy po expozici 7 hod. v KK – četné drobné rezavé body (tečky) na plochách řezů v dusíku, několik rezavých bodů anebo drobných skvrn u hran vnitřních otvorů na vzorku řezaném v kyslíku

#### *Po delších dobách expozice (420 až 480 hodin)*

Po delších dobách expozice vzorků v KK se dá konstatovat, že četnost a rozsah korozního napadení pro vzorky řezané v atmosféře kyslíku a dusíku se vyrovnával (obr. 5.19), přičemž o něco menší rozsah koroze byl u vzorků řezaných v atmosféře kyslíku. Na obr. 5.20 a 5.21 je zachyceno porovnání korozního napadení pro vzorky řezané v atmosféře kyslíku a dusíku po delších dobách expozice.





**Obr. 5.19** Podíl rzi na ploše řezu v závislosti na čase během expozice v komoře klimatické



**Obr. 5.20** Pohled na horní plochy vzorků po expozici 420 hod. v KK (35 °C, 95 % r.v.)



**Obr. 5.21** Porovnání vzorků po expozici 480 hod. v KK (35 °C, 95 % r.v.)

## 5.5 Metalografie pozinkovaných plechů

Na obr. 5.28 byly zobrazeny vzorky pozinkovaných plechů pro metalografické šetření. Zkoumány byly vzorky jak po expozici v solné mlze (po 60 hodinách expozice), tak vzorky bez korozní expozice. Metalografické výbrusy byly provedeny ve dvou rovinách, rovnoběžně (obr. 5.29) a kolmo k povrchu plechu.

Pro metalografické šetření bylo nejprve potřeba metalografické výbrusy připravit a označit. Všechny vzorky byly na laboratorním stroji Labopress zalisovány za tepla do bakelitu při teplotě 180 °C a tlakové síle 20000 N. Poté následovalo rovinné broušení na hrubých a jemných brusných papírech SiC. Leštění vzorků bylo provedeno na podložce Mol – 3 mikronová diamantová suspenze. Pro potřeby sledování základní struktury na světelném mikroskopu byly vzorky naleptány v nitalu (4 % kyselina dusičná v alkoholu).



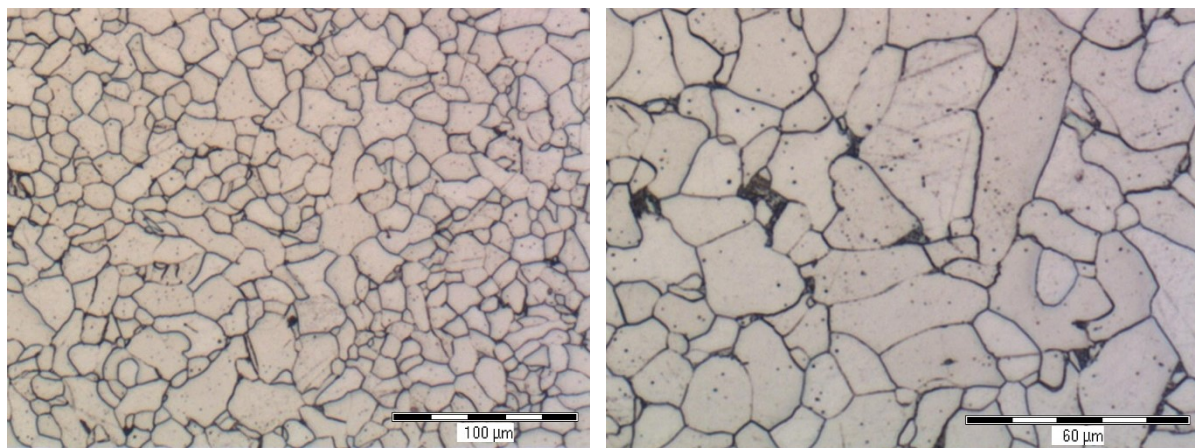
**Obr. 5.28** Vzorky odřezané pro metalografické šetření (zleva vz. N1km a O1km – po 60 hod. v KS, dále vz. N3bm a O3bm – bez korozní expozice)



**Obr. 5.29** Metalografické výbrusy vzorků, rovnoběžné s povrchem plechu (zleva N1km, O1km, N3bm a O3bm)

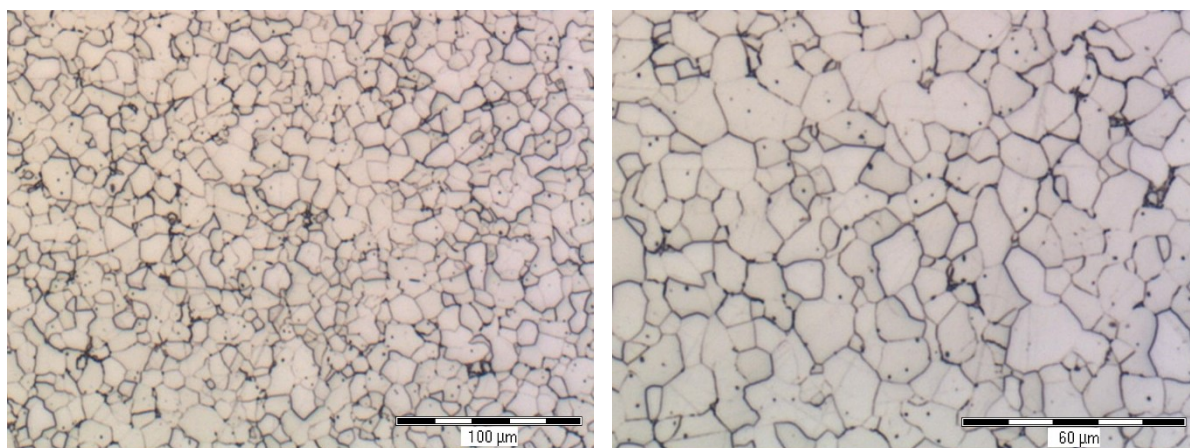
### *Metalografie základního materiálu vzorků*

Na obr. 5.30 byla zachycena základní struktura materiálu vzorku, který byl řezán v prostředí kyslíku a který nebyl vystaven korozní expozici. Na tomto vzorku bylo možné pozorovat základní strukturu ocelového plechu – ferit s ostrůvky perlitu a terciálního cementitu.



**Obr. 5.30** *Struktura materiálu – feritická ocel (nizkougliková, nelegovaná), vzorek O3bm, rovnoběžný výbrus, středová část plechu, při různém zvětšení*

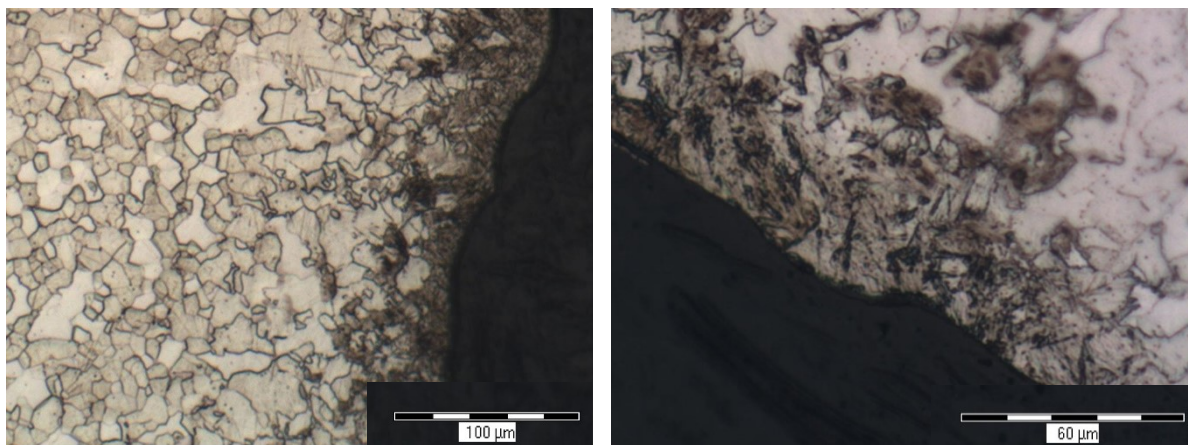
Pro vzorky řezané v atmosféře dusíku, které nebyly vystaveny korozní expozici lze konstatovat taktéž, že jejich základní struktura byla tvořená feritem s ostrůvky perlitu a terciálního cementitu (obr. 5.31).



**Obr. 5.31** *Struktura materiálu – feritická ocel (nizkougliková, nelegovaná), vzorek N3bm, rovnoběžný výbrus, středová část plechu, při různém zvětšení*

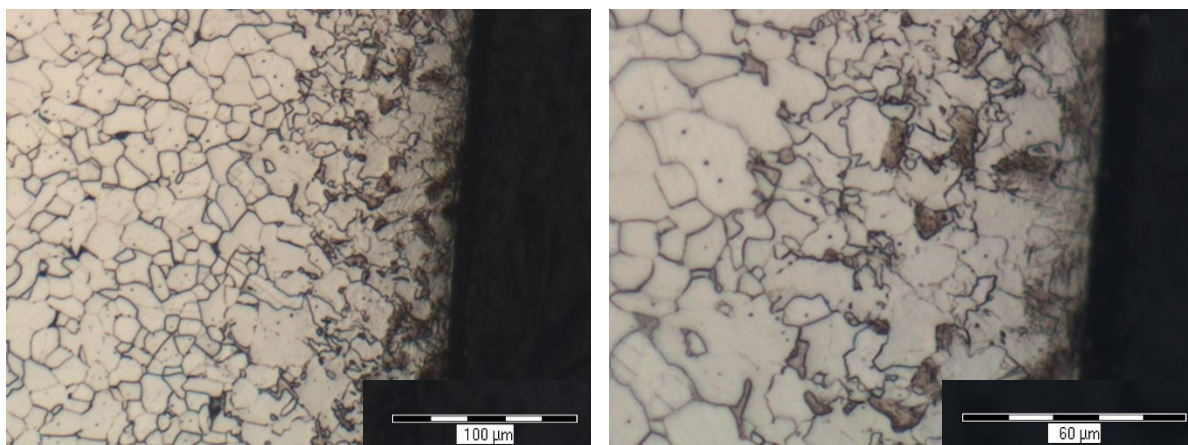
Změnu základní struktury oceli bylo možné pozorovat v oblastech u řezu laserem. Pro vzorky řezané laserem v atmosféře s dusíkem, které byly bez korozní expozice, se v místech u laserového řezu vyskytovala bainitická struktura (obr. 5.32).





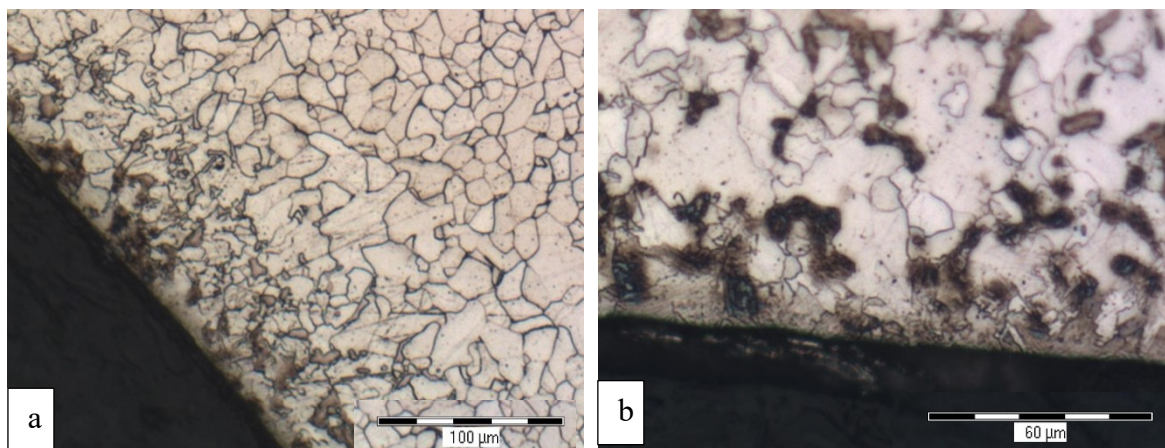
**Obr. 5.32** Změna struktury u řezu laserem s dusíkem, vzorek N3bm, rovnoběžný výbrus, při různém zvětšení

U vzorků řezaných v atmosféře s kyslíkem (bez korozní expozice) se v oblastech u řezu projevila také změna základní struktury oceli – výskyt bainitu (obr. 5.33).



**Obr. 5.33** Změna struktury u řezu laserem s kyslíkem, vzorek O3bm, rovnoběžný výbrus, různá místa

Po korozní expozici byla pro oba typy vzorků struktura obdobná jako před korozní expozicí – tj. výskyt bainitu v místech u řezu, zatímco mimo oblast blízkou řezu přítomnost feriticko-perlitické struktury (obr. 5.34a a 5.34b).



**Obr. 5.34** Změna struktury u řezu laserem, mimo oblast řezu feriticko-perlitická struktura základního materiálu (oceli). A) vzorek N1km, B) vzorek O1km – oba po expozici 60 hod. v KS

Na metalografických výbrusech bylo provedeno měření tvrdosti základního materiálu mimo oblast řezů laserem s použitím kyslíku nebo dusíku (tab. 5.18) podle normy ČSN EN ISO 6507-1. Výsledky potvrzují měkkou feritickou strukturu ( $135 \pm 15$  HV5) s malým podílem perlitu. Ze získaných dat měření tvrdosti nebylo možné prokázat přítomnost bainitu, neboť tepelně ovlivněná zóna, ve které by se bainit mohl vyskytovat, měla šířku pouze několik desítek  $\mu$ m a hodnoty tvrdosti, respektive změny tvrdosti v takto malé oblasti nelze zaznamenat.

**Tab. 5.18** Výsledky orientačního měření tvrdosti

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdost HV5	151,5	151,0	144,0	128,0	153,0	121,5	137,0	132,0	117,0	110,0
Průměr	134,5 HV5									
Směrodatná odchylka	14,6 HV5									

Na vyleštěném metalografickém výbrusu v oblasti u řezu laserem i na základním materiálu byly provedeny orientační měření mikrotvrdosti podle Vickerse (tab. 5.19). Maximální naměřené hodnoty u řezu laserem (380 HV0,01), byly přibližně 3 x vyšší než na základním neovlivněném materiálu (123 HV0,1). Pro pregnantnější analýzu změny mikrostruktury a zobrazení profilu změny mikrotvrdosti je potřeba obsáhlejší sadu naměřených dat v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

**Tab. 5.19** *Výsledky orientačního měření mikrotvrdosti*

Č. měření	1	2	3	4	5	6
Tvrdost	123 HV0,1	179 HV 0,05	142 HV 0,05	198 HV 0,05	384 HV 0,01	177 HV 0,01
Místo měření/fáze	zákl. mater. (ferit)	okraj (ferit + bainit)	zákl. mater. (ferit)	okraj (bainit + ferit)	okraj (bainit)	zákl. mater. (ferit)

Důkladná analýza struktury u řezu laserem by vyžadovala použití transmisní elektronové mikroskopie anebo rentgenové difrakční analýzy.

## 6. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo posouzení struktury a korozních vlastností pozinkovaných ocelových plechů v oblastech řezu laserem. Pro účely zkoumání a pozorování byly použity dodané vzorky pozinkovaných ocelových plechů řezané tavně laserem v atmosféře dusíku a kyslíku.

V teoretické části diplomové práce byly charakterizovány jednotlivé způsoby zinkování, tj. nanášení zinkových povlaků, mj. s ohledem na strukturu nebo chemické složení zinkových vrstev. Dále byl blíže popsán proces laserového řezání a jeho různé typy. Podstatná část textu byla věnována korozi a korozním vlastnostem zinkovaných povlaků v různých prostředích a problematice korozní odolnosti v oblasti laserového řezu.

V experimentální části diplomové práce bylo pro zhodnocení korozní odolnosti pozinkovaných plechů v oblastech řezu laserem provedeno několik druhů zkoušek a testů. Nejprve byly z komparativních důvodů změřeny tloušťky zinkových povlaků na pleších s oběma typy řezů (provedených v atmosféře kyslíku i dusíku). K posouzení korozních vlastností posloužily získané hodnoty elektrochemických zkoušek provedené na plochách řezů. Neocenitelným přínosem byly výsledky z expozičních zkoušek v komoře solné a komoře klimatické. V neposlední řadě byla experimentální část doplněna o metalografické šetření nejen oblastí blízkých řezu laserem, ale i základního materiálu.

Z měření tloušťky zinkových povlaků, které bylo provedeno jak elektromagnetickou metodou, tak na základě metalografických snímků, vyplynulo, že velikost těchto povlaků se pohybovala průměrně mezi 15-30  $\mu\text{m}$ . Na zhotovených metalografických snímcích z oblasti blízko řezu laserem byla zjištěna změna mikrostruktury – výskyt bainitu, zatímco struktura základního materiálu byla feriticko-perlitická.

Při expozičních zkouškách v komoře solné byla vysledována vyšší korozní odolnost u vzorků řezaných s kyslíkem než s dusíkem, což platilo při kratších dobách expozice cca do 150 hod. Po delších časech v komoře solné (nad 160 hod.) se rozsah korozního napadení vyrovnával pro oba typy vzorků. Na plochách řezu nebyl ochranný účinek zinku pozorován.

Z výsledků testů z komory klimatické (do 480 hod.) vyplynulo, že odolnější zůstávaly vzorky řezané v atmosféře s kyslíkem, na kterých se vytvořila po laserovém řezání oxidická vrstva. V místech, kde došlo k narušení nebo poškození této vrstvy, se nacházelo zvýšené korozní napadení. Po delších časech expozice se rozsah napadení v oblastech obou typů řezů

vyrovnával. Na řezech zhotovených v atmosféře s dusíkem byl odhalen mírný ochranný účinek zinku (dosah asi 0,5 mm od hran).

Podle naměřených hodnot elektrochemických zkoušek bylo možné konstatovat, že vyšší korozní odolnosti dosahovaly plochy řezů, které byly vytvořeny v atmosféře s kyslíkem. O náchylnosti k bodovému charakteru korozního napadení na plochách řezů svědčila přítomnost tzv. polarizační smyčky v grafech závislosti proudové hustoty na korozním potenciálu.



## Seznam použitých zkratk

E	Elektrochemický potenciál	[V]
$E_{\text{cor}}$	Korozní potenciál	[V]
$E_d$	Potenciál depasivace	[V]
$E_r$	Potenciál repasivace	[V]
F	Síla	[N]
$h_p$	Tloušťka zinkového povlaku zhotovená žárovým ponorem	[ $\mu\text{m}$ ]
J	Proudová hustota	[A/cm <sup>2</sup> ]
m	Hmotnost	[g]
P	Výkon	[kW]
p	Tlak	[MPa]
pH	Vodíkový exponent	[1]
$r_{\text{av}}$	Průměrná korozní rychlost	[ $\mu\text{m}/\text{rok}$ ] [mm/rok],
$r_{\text{corr}}, r_c$	Rychlost koroze	[ $\mu\text{m}/\text{rok}$ ]
$r_{\text{lin}}$	Ustálená korozní rychlost	[ $\mu\text{m}/\text{rok}$ ]
$R_z$	Průměrná hodnota drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_p$	Polarizační odpor	[ $\Omega\cdot\text{cm}^2$ ]
S	Plocha průřezu	[m <sup>2</sup> ], [mm <sup>2</sup> ]
T	Teplota	[°C]
t	Čas	[hod]
DV	Deionizovaná voda	
HCl	Kyselina chlorovodíková	
KK	Komora klimatická	
KMI	Katedra materiálového inženýrství	
KS	Komora solná	
NaCl	Chlorid sodný	
NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý	
NaOH	Hydroxid sodný	
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Síran sodný	
RV, RH, r.v.	Relativní vlhkost	
SCE	Nasycená kalomelová elektroda	
SiC	Karbid křemíku (brusný papír)	
SHE	Standardní vodíková elektroda	
ZnO <sub>2</sub>	Oxid zinečnatý	
Zn(OH) <sub>2</sub>	Hydroxid zinečnatý	

## LITERÁRNÍ ZDROJE

- [1] SHLIBLI, S.M.A., B.N. MEENA a R. REMYA. A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process. *Surface and Coatings Technology*. 2015, (vol.262), s.210-215.
- [2] *Příručka žárového zinkování*. 2. vydání. Ostrava: Asociace český a slovenských žárových zinkoven, 2011.
- [3] KUKLÍK, Vlastimil a Jan KUDLÁČEK. *Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures*. Butterworth-Heinemann, 2016. ISBN 978-0-08-100753-2.
- [4] KREIBICH, Viktor a Karel HOCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1984.
- [5] MARDER, A.R. The metallurgy of zinc-coated steel. *Progress in Materials Science*. 2000, (vol. 45), s. 171-271.
- [6] RAHRIG, Philip G. *Prerequisites When Designing for Hot-Dip Galvanizing* [online]. 2013 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.structuremag.org/?p=562>
- [7] NATRUP, F. a W. GRAF. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Woodhead Publishing, 2015, s.737-750. ISBN 978-0-85709-592-3.
- [8] MAREK, Tomáš. *Ochrana proti korozi zinkovými povlaky*. Brno, 2009. Bakalářská práce. MENDELU v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastimil Chrást, CSc.
- [9] Zinc-Rich Paint. *Galvanizeit.org* [online]. [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://www.galvanizeit.org/corrosion/corrosion-protection/zinc-coatings/zinc-rich-paint>
- [10] Coatings: Types of Zinc Coatings. *Zinc.org* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.zinc.org/coatings/>
- [11] ION, John C. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2007 [cit. 2017-11-23]. ISBN 978-0-7506-6079-2.

- [12] *Laserové a plazmové řezání* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [13] KRAMOLIŠ, Lukáš. *Laserové řezání s podporou vzduchu*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Libor Mrňa.
- [14] UHLIG, Herbert H. a R. Winston REVIE. *Corrosion and Corrosion Control*. 3rd. New York: Wiley, 1985. ISBN 0-471-07818-2.
- [15] WĘGRZYŃKIEWICZ, Sylwia. *The influence of cutting metal elements on the nature and corrosion resistance of the zinc coating: auto-abstract doctoral dissertation*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3742-0.
- [16] LIU, Y.W., Z.Y. WANG, G.W. CAO a Y. HUO. Study on corrosion behavior of zinc exposed in coastal-industrial atmospheric environment. *Materials Chemistry and Physics*. 2017, (vol.198), s.243-249.
- [17] LASEK, Stanislav. *Základy degradačních procesů*. 1.vydání. Ostrava, 2013, s.149. ISBN 978-80-248-3373-6.
- [18] MCCAFFERTY, E. *Introduction to Corrosion Science*. Springer-Verlag New York, 2010. ISBN 978-1-4419-0454-6.
- [19] ČERNÝ, Miroslav. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [20] KREISLOVÁ K., KOUKALOVÁ A., LANIK T., HOVORKOVÁ K., Zinc coatings lifetime on the road infrastructure structures. *In 17 Hot Dip Galvanizing Conference*, Ostrava, 2011.
- [21] STANSBURY, Ele Eugene a Robert Angus BUCHANAN. *Fundamentals of electrochemical corrosion*. Materials Park: ASM International, 2000. ISBN 0-87170-676-8.
- [22] *Povrcháři* [online]. 2012, (č.6) [cit. 2018-03-07]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/201206\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/201206_povrchari.pdf)
- [23] *Galvanic/Bimetallic (including Cut Edge) Corrosion of Galvanized Sheet* [online]. 2014 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://www.galvinfo.com/wp-content/uploads/sites/8/2017/05/GalvInfoNote-3-6.pdf>

- [24] *How Zinc Protects Steel* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [http://www.galvinfo.com/wp-content/uploads/sites/8/2017/05/GalvInfoNote\\_3\\_1.pdf](http://www.galvinfo.com/wp-content/uploads/sites/8/2017/05/GalvInfoNote_3_1.pdf)
- [25] *Fretting Corrosion (Transit Abrasion) on Galvanized Sheet* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [http://www.galvinfo.com/wp-content/uploads/sites/8/2017/05/GalvInfoNote\\_3\\_5.pdf](http://www.galvinfo.com/wp-content/uploads/sites/8/2017/05/GalvInfoNote_3_5.pdf)
- [26] Fretting Corrosion. *Corrosionpedia.com* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/definition/553/fretting-corrosion>
- [27] SCHWEITZER, Philip A. *Encyclopedia of CORROSION TECHNOLOGY*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2004. ISBN 0-8247-4878-6.
- [28] KREISLOVÁ, K., D. KNOTKOVÁ, A. KOUKALOVÁ, A. GEIPLOVÁ a P. DUŠEK. Metodika stanovení životnosti zinkových povlaků v atmosférickém prostředí. *Konstrukce.cz* [online]. 6.1.2011 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/metodika-stanoveni-zivotnosti-zinkovych-povlaku-v-atmosferickem-prostredi/>
- [29] DE LA FUENTE, D., J.G CASTANO a M. MORCILLO. Long-term atmospheric corrosion of zinc. *Corrosion Science*. 2007, (vol.49), s.1420-1436.
- [30] ŽABIČKA, Zdeněk a Zdeněk POSPÍCHAL. *Žárově pozinkované ocelové potrubí a koroze* [online]. 16.4.2012 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://voda.tzb-info.cz/materialy-voda-kanalizace/8493-zarove-pozinkovane-ocelove-potrubí-a-koroze>